

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektroniky

Modelování a simulace regulovaného pohonu se synchronním
strojem
bez uvažování elektromagnetických dějů

Modelling and Simulation of Synchronous Motor Controlled
Drive
without Electromagnetic Processes Inclusion

2010

Bc. Jan Cienciala

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
6.5.2010

Bc. Jan Cienciala

Poděkování

Velmi rád bych touto cestou poděkoval všem lidem, kteří mi byli oporou a pomohli mi při tvorbě této diplomové práce. Na prvním místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce panu doc. Ing. Ivo Neborákovi, CSc, za pomoc při řešení a poskytnutí podkladů. Dále bych velmi rád poděkoval své rodině za podporu během celého studia i při tvorbě této práce.

Abstrakt

Během této práce bude mým hlavním úkolem pracovat s matematickými modely synchronních strojů. Pokusím se tento problém řešit jak matematicky pomocí známých a používaných rovnic tak pokusně za pomoci simulačního programu Matlab Simulink. Na začátku si něco řekneme o použitém softwaru, který tuto možnost poskytuje. Dále se budeme věnovat základnímu rozdělení modelování synchronních strojů. Pro tuto práci je nejdůležitější dělení na dvě skupiny. Modely s uvažováním elektromagnetických dějů a bez uvažování těchto dějů. Další pokračování je zaměřeno právě na druhou část, a to se zanedbanými elektromagnetickými ději. Pro tento případ bude sestrojeno dle matematického vyjádření elektrického momentu blokové schéma, které bude základem pro následnou simulaci dané struktury. V poslední fázi se zaměřím na samotnou simulaci a prezentaci výsledných průběhů.

Abstract

During this work, my main task will work with mathematical models of synchronous machines. I will try to solve this problem both mathematically with known and used equations and experimental simulation using Matlab Simulink. At the beginning you say something about the software used to provide this option. We will pay the basic distribution modeling of synchronous motors. For this work is the most important division into two groups. Models with consideration of electromagnetic phenomena and ignoring these processes. Another sequel is geared specifically to the second part and the neglected electromagnetic storyline. For this case will be constructed according to the mathematical expression of electrical torque block diagram, which will form the basis for subsequent simulation of the structure. The last phase will focus on the actual simulation and presentation of the resulting waveform.

Klíčová slova

Synchronní motor, synchronní stroj, pohon, elektrický moment, indukčnost, regulace, regulátor, přenos, synchronní otáčky, zátěžný moment, simulink, momentová charakteristika, výstupní průběhy.

Key words

Synchronous motor, synchronous machina, drive, electric moment, inductance, regulation, regulátor, synchronous speed, load torque, simulink, moment characteristic, output waveform.

OBSAH

Seznam použitého označení a zkratk	3
1. Úvod	5
2. Teoretický rozbor	
2.1 Návrhy jednotlivých regulačních bloků	6
2.1.1 Návrh schématu regulační struktury	6
2.1.2 Určení typů a optimálních parametrů regulátorů	6
2.1.3 Samotný návrh	6
2.2 Rozdělení programů na dané úrovně	7
3. Způsoby modelování synchronních strojů	8
3.1 Popis synchronního stroje	8
3.1.1 Význam a použití	8
3.1.2 Základy konstrukce synchronních strojů	8
3.1.3 Princip činnosti synchronního stroje	9
3.1.4 Způsoby spouštění a řízení rychlosti synchronního motoru	9
3.2. Matematický model synchronního motoru s budicím vinutím, vyniklými póly a s tlumicím vinutím s uvažováním elektromagnetických dějů	10
3.3. Matematický model synchronního motoru s budicím vinutím, vyniklými póly, s tlumicím vinutím v absolutních veličinách	10
3.4. Matematický model synchronního motoru s budicím vinutím, vyniklými póly, a s tlumicím vinutím v poměrných veličinách	15
3.5. Matematický model synchronního motoru se zanedbáním elektromagnetických dějů	16
4. Sestavení modelu pohonu se synchronním motorem bez uvažování elektromagnetických dějů	18
4.1 Použitý software	18
4.1.1 Matlab – seznámení s možnostmi prostředí	18
4.1.2 Simulink	19
4.2 Sestavení simulačního modelu synchronního motoru	20
4.3 Návrh a sestavení regulátoru rychlosti pro synchronní motor	22
4.4 Regulace rychlosti	22
4.4.1 Regulace rychlosti s podřadnou smyčkou proudu	22
4.4.2 Regulace rychlosti bez podřazené smyčky proudu	24
5. Simulace v programu Matlab Simulink	26
5.1 Sestavení simulačního modelu	26
5.1.1 Popis jednotlivých bloků modelu	27
5.2 Simulace pohonu bez připojení momentu zátěže s konstantní hodnotou otáček.	28

5.3 Simulace synchronního pohonu bez zátěže s reakcí na skokovou změnu otáček.	30
5.4 Simulační ověření reakce pohonu na reverzaci.	32
5.5 Simulační ověření reakce pohonu na připojenou zátěž	34
5.6 Simulační ověření průběhu veličin za předpokladu $L_d \neq L_q$, $M_L = 0$	36
5.7 Simulační ověření průběhu veličin za předpokladu $L_d \neq L_q$, $M_L \neq 0$	38
6. Závěr	40

Seznam použitého označení

Značky a symboly

2p	[-]	počet pólů
c ϕ	[Vs]	budící konstanta stejnosměrného stroje
f	[Hz]	kmitočet
F	[-]	přenosová funkce
i, I	[A]	proud
J	[kgm ²]	Moment setrvačnosti
L	[H]	indukčnost
M	[Nm]	moment
n	[ot/min]	otáčky
N	[-]	počet pólů
p	[-]	počet pólových dvojic
P	[W]	výkon
R	[Ω]	odpor
s	[-]	skluz
t	[s]	čas
u, U	[V]	napětí
X	[Ω]	reaktance
Ωm	[rad/s]	mechanická úhlová rychlost
Ψ	[Wb]	zpražené magnetické toky
v	[-]	poměrná úhlová rychlost
θ	[rad]	úhel pootočení
σ	[-]	činitel celkového rozptylu
τ	[-]	poměrná časová konstanta
ω	[rad/s]	elektrická úhlová rychlost

Indexy

ck	cyklokonvertor
d	reálná osa rotorového souřadného systému
D	náhradní vinutí tlumiče synchronního motoru
e	elektromagnetický
ef	efektivní
el	elektrický
f	buzení
k	nakrátko
L	zátěžný
m	mechanický, maximální, magnetický
max	maximální
n	jmenovitý
PM	permanentní magnet
q	imaginární osa rotorového souřadného systému
Q	náhradní vinutí tlumiče motoru
r	rotorový
s	statorový, synchronní, skutečný
TG	tachogenerátor
σ	rozptylový

1.Úvod

Základním tématem této práce jsou synchronní motory a jejich regulace. Jedná se v dnešní době o poměrně zajímavé téma, protože čím dál častěji se tyto motory používají i v běžné praxi. Tento fakt je zapříčiněn neustálým vývojem a novými možnostmi regulace. Synchronní motory obecně pracují na podobném principu jako motory asynchronní, ale jejich provoz v běžné praxi je poněkud náročnější. V této práci jsem se pokusil přiblížit dva pohledy na návrh a realizaci motoru samotného, ale také celého regulovaného pohonu. Základní dělení je z hlediska uvažování nebo zanedbání elektromagnetických dějů. Uvádím zde oba způsoby, ale podrobněji se budeme věnovat pouze situaci se zanedbáním elektromagnetických dějů. Tato situace bude namodelovaná jak matematicky tak i ve výpočetním programu Matlab-simulink. Za pomoci tohoto programu si ověříme chování modelu s různými průběhy vstupních hodnot.

2. Teoretický rozbor

V oblasti pohonu jsou v dnešní době na velkém vzestupu všechny druhy regulace. Regulují se jak stejnosměrné, tak v hlavní míře střídavé pohony. Regulační aparát v dnešní době je velmi složité zařízení, které se skládá z mnoha bloků. Matematické vyjádření celého problému je otázkou řešení mnoha složitých soustav rovnic. Vzhledem k náročnosti dnešních požadavků na regulaci se jedná z matematického hlediska obecně o nelineární, mnohoparametrový impulsní systém, jehož analytické řešení je téměř nemožné.

2.1 Návrhy jednotlivých regulačních bloků

2.1.1 Návrh schématu regulační struktury

V návrhu musíme podle zadaných a požadovaných parametrů zahrnout jak řešení řízení všech požadovaných veličin, tak řešení potřebných výstupů a možností pro požadovanou regulaci. Regulační struktura se obecně skládá z několika základních bloků: regulátor, akční člen, zpětná vazba, vyhodnocení.

2.1.2 Určení typů a optimálních parametrů regulátorů

Během určování regulátorů musíme opět brát zřetel na vstupní požadavky regulace, výkonovou stránku, ale také v dnešní době čím dál tím důležitější, a to ekonomickou stránku věci. Bohužel je to smutné, ale tato složka v dnešní době zastupuje dost podstatný parametr při volbě regulace přímo v obchodní sféře. Proto se často volí, pokud to požadavky na přesnost dovolí, co možná nejjednodušší regulace, a tím i nízká cena, která dovoluje dobré konkurenční postavení na světových trzích.

2.1.3 Samotný návrh

S rozvojem výpočetní techniky je v dnešní době již samotný návrh a simulace podstatně ulehčená díky velkému rozvoji nových simulačních programů, a neustálým vývojem programu již starších.

Většina pohonů se skládá ze tří základních částí : měniče, řízení a elektrického stroje. Simulační programy jsou ale bohužel stále zaměřeny převážně na jeden s těchto oborů, a bohužel i dnes ještě není zabezpečená kompatibilita jednoho výstupu pro vstup do programu druhého. A proto se ve většině zdrojů uvádí, že je nutno každou část navrhnout a nasimulovat v jiném programu a celkový komplet složit pouze s těchto výstupů jako hotový blok.

Simulačních programů je na světovém trhu již velká spousta, ale pokusím se Vám lehce v následující kapitole přiblížit alespoň několik známějších a na katedře elektroniky využívaných programů přiblížit.

2.2 Rozdělení programů na dané úrovně

Jak se uvádí v literatuře (1) dají se programy pro návrh a simulaci rozdělit do tří základních úrovní. Níže uvádím přehled a jednoduchou specifikaci daných úrovní.

- Úroveň 1- Jedná se o základní úroveň ve které je možné zkoumat jednotlivé parametry daných součástek v měniči, dále můžeme sledovat proudy a průběhy pouze několika součástek a polovodičů.
- Úroveň 2- Jedná se o pokročilejší programy, které jsou schopny zkoumat a simulovat jak jednotlivé polovodiče a základní součástky, tak již i měničové celky a základní strukturu.
- Úroveň 3- Jedná se o nejvyšší úroveň, ve které se již analyzují složité algoritmy regulace, kvalita řízení a stabilita celého navrhovaného systému.

3. Způsoby modelování synchronních strojů.

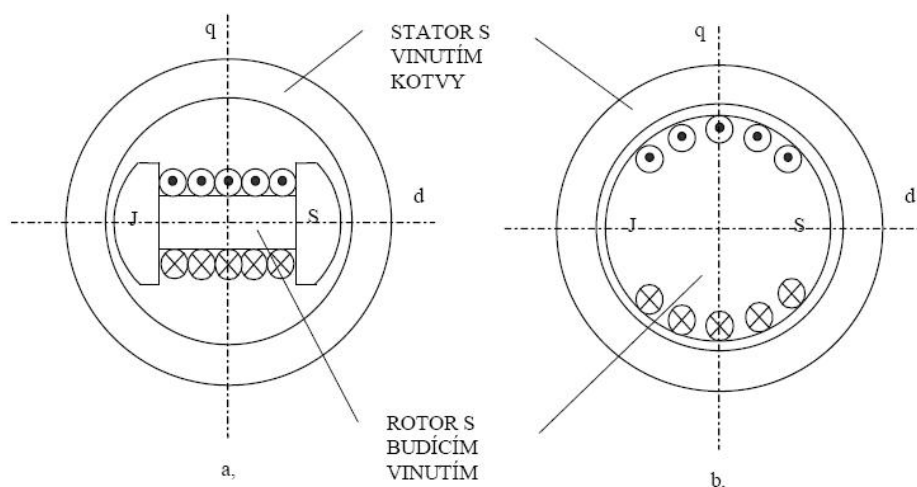
3.1 Popis synchronního stroje

3.1.1. Význam a použití

Synchronní stroje jsou dodnes nejdůležitějšími elektrickými stroji pro výrobu elektrické energie. Tyto synchronní generátory nazývané také *alternátory* jsou nejčastěji trojfázové. Alternátory, které jsou v elektrárnách poháněny parními nebo plynovými turbínami při rychlosti otáčení 3000 min⁻¹ a nazývají se *turboalternátory*, nebo jsou-li poháněny vodními turbínami při rychlosti obvykle podstatně nižší nazývají se *hydroalternátory*. Později se synchronní stroje začaly používat také jako motory, jednak jako *synchronní kompenzátory* (pro zlepšování účinníku v elektrické síti), jednak pro pohony velkých čerpadel, ventilátoru a kompresoru (průmyslových zařízení, které nevyžadují časté spouštění a pracují s konstantní rychlostí a s málo proměnným zatížením). S rozvojem polovodičové a výpočetní techniky se synchronní motory uplatňují i v oblasti pohonu s řízením rychlosti a polohy a to jak u pohonu velkých výkonů řádově megawattu, tak i u malých výkonu v oblasti průmyslové automatizace a robotiky (tzv. servomechanismy)

3.1.2. Základy konstrukce synchronních strojů

Stator synchronního stroje se příliš neliší od statoru asynchronního stroje a obsahuje trojfázové vinutí, které je umístěno v drážkách. Na rotoru je umístěno budící vinutí napájené stejnosměrným proudem přes sběrací kroužky a kartáče. Podle provedení rotoru se rozlišují dva základní typy synchronních strojů, a sice stroje s vyniklými póly (hydrostroje obr.1a) a stroje s hladkým rotorem (turbostroje) obr.1b). Synchronní stroje s permanentními magnety mají místo budícího vinutí na rotoru magnety. Chlazení synchronních strojů je vzduchové, u strojů vysokých výkonu vodíkové a vodní.



Obr 3.1.1 Možné konstrukční provedení synchronních strojů [5]
a – s vyniklými póly, b- s hladkým rotorem

3.1.3. Princip činnosti synchronního stroje

Statorové vinutí je obdobné jako u asynchronního motoru.. Rotorové vinutí je napájeno stejnosměrným proudem, ten vybudí stejnosměrné magnetické pole, které se uzavírá přes stator.

Generátor: Otáčí-li poháněcí stroj (napr.turbína) nabuzeným rotorem, indukují se v jednotlivých cívkách statoru střídavá napětí sinusového průběhu, která jsou v jednotlivých cívkách vzájemně časově posunutá o úhel 120. Připojí-li se ke svorkám vinutí statoru trojfázová zátěž (tzn., že se alternátor zatíží), vinutím statoru bude procházet střídavý elektrický proud. Prochází-li vinutím statoru střídavý trojfázový proud, vzniká stejně jako u asynchronního stroje točivé magnetické pole s otáčkami n_{S1} , které má stejnou rychlost otáčení jako rotor a jeho magnetické pole, skluz (rozdíl otáček) stroje je tedy nulový. Proto se stroj nazývá synchronní. Rotor stroje vychýlen oproti magnetickému poli o určitý kladný úhel (předbíhá).[5]

Motor: Konstrukčně je motor obdobný synchronnímu alternátoru. Stator motoru je připojen ke trojfázové střídavé síti, proud statoru vytvoří točivé magnetické pole, které se otáčí synchronní rychlostí. Rotor vytvářející magnetický tok je vtažen do točivého pole a otáčí se stejnými –synchronními otáčkami. Velikost momentu motoru je v závislosti na rychlosti konstantní a je závislá pouze na záporném úhlu vychýlení rotoru (zpožďuje se) oproti magnetickému poli. Maximální mezní hodnota tohoto momentu M_{max} je 5π tomto úhlu rovném $-\pi/2$. Jeho zvýšením dojde k výpadku ze synchronismu a motor se zastaví (poruchový stav doprovázený proudovými a momentovými rázy).[5]

3.1.4 Způsoby spouštění a řízení rychlosti synchronního motoru

Nejpoužívanější způsoby rozběhu [5].

a) asynchronní rozběh : kromě budicího vinutí je na rotoru umístěno ještě tlumící (rozběhové) klecové vinutí. Motor se tedy rozbíhá jako asynchronní motor nakrátko, po dobu rozběhu je budicí vinutí odpojeno. Jakmile motor dosáhne otáček blízkým synchronním, nabudí se a rotor se vtáhne do synchronismu.

b) rozběh pomocným motorem - pro rozběh se použije dudič (stejnosměrný generátor), který je umístěn na hřídeli motoru, nebo rozběhový asynchronní motor, který se používá pro rozběhy strojů vysokých výkonu. Tento způsob rozběhu se téměř nevyužívá.

c) řízený rozběh - motor je napájen z měniče kmitočtu umožňujícího plynulé zvyšování kmitočtu .

3.2. Matematický model synchronního motoru s budícím vinutím, vyniklými póly a s tlumícím vinutím s uvažováním elektromagnetických dějů

Při sestavování matematického modelu synchronního motoru se vychází z podobných zjednodušujících předpokladů jako tomu bylo u asynchronního motoru.

Předpokládá se:

- a) Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře a tedy i indukovaného napětí je sinusový, přičemž je obecně uvažován rotor s vyniklými póly, tj. s různou magnetickou vodivostí v podélném a příčném směru.
- b) Zavedení jednoho náhradního obvodu tlumiče v každé ose (D a Q).
- c) Ztráty v železe jsou zanedbány.
- d) Odporů a indukčností jsou stejné ve všech statorových fázích a jsou konstantní, tj.

zanedbávají se:

- změny odporů statoru a rotoru na teplotě
- nasycení magnetického obvodu
- hysteréze magnetického obvodu
- změny odporů a indukčností na kmitočtu (skinefekt)

Rovněž činný odpor a indukčnost napájecího zařízení (napájecí síť, měnič, přívody atd.) se při řešení přechodných dějů obvykle zanedbávají.

3.3. Matematický model synchronního motoru s budícím vinutím, vyniklými póly, a s tlumícím vinutím v absolutních veličinách.

Při tvorbě modelu je uvažován běžný třífázový stator, obdobný jako u asynchronního motoru. Rotor se skládá z budícího vinutí f , které je uloženo v podélné ose. Dále je na rotoru tlumící vinutí, které se matematicky nahrazuje vinutím D, Q umístěné v podélné a příčné ose rotoru. Pro jednotlivá vinutí statoru i rotoru s fázemi $k = a, b, c$ – (stator), f, D, Q – (rotor) jsou napěťové rovnice pro okamžité hodnoty :

$$U_k = R_k I_k + \frac{d\Psi_k}{dt} \quad 3.2-0$$

Vzhledem k tomu, že tlumící vinutí je spojeno na krátko, platí $u_D = u_Q = 0$

Zpražené magnetické toky lze vyjádřit pomocí vlastních a vzájemných indukčností.

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} & L_{bf} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c & L_{cf} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_f & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{Df} & L_D & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{Qf} & L_{QD} & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad 3.2-1$$

Hodnoty s jedním indexem – Vlastní indukčnost

Hodnoty se dvěma indexy – Vzájemná indukčnost

Vzájemné indukčnosti prostorově kolmých vinutí předpokládáme nulové.

$$L_{fQ} = L_{Qf} = L_{DQ} = L_{QD} = 0 \quad 3.2-2$$

Vlastní a vzájemné indukčnosti rotoru L_f , L_d , L_Q , L_{fD} nezávisí na poloze rotoru a jsou konstantní. Ostatní indukčnosti jsou funkcí úhlu natočení rotoru θ .

Pro vlastní indukčnosti statorových vinutí platí

$$\begin{aligned} L_a &= L_{a0} + L_{m1} \cos(2\vartheta) \\ L_b &= L_{a0} + L_{m1} \cos(2\vartheta - 2\pi/3) \\ L_c &= L_{a0} + L_{m1} \cos(2\vartheta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad 3.2-3$$

Pro vzájemné indukčnosti statorových vinutí

$$\begin{aligned} L_{cb} &= L_{bc} = -L_{ab0} + L_{m1} \cos(2\vartheta) \\ L_{ba} &= L_{ab} = -L_{ba0} + L_{m1} \cos(2\vartheta - 2\pi/3) \\ L_{ac} &= L_{ca} = -L_{ab0} + L_{m1} \cos(2\vartheta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad 3.2-4$$

Vzájemné indukčnosti mezi statorovými a budicím vinutími

$$\begin{aligned} L_{fa} &= L_{af} = L_{afm} \cos(\vartheta) \\ L_{fb} &= L_{bf} = L_{afm} \cos(\vartheta - 2\pi/3) \\ L_{fc} &= L_{cf} = L_{afm} \cos(\vartheta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad 3.2-5$$

Vzájemné indukčnosti mezi tlumícími a statorovými vinutími

$$L_{da} = L_{ad} = L_{aDm} \cos(\vartheta)$$

$$L_{Db} = L_{bd} = L_{aDm} \cos(\vartheta - 2\pi/3)$$

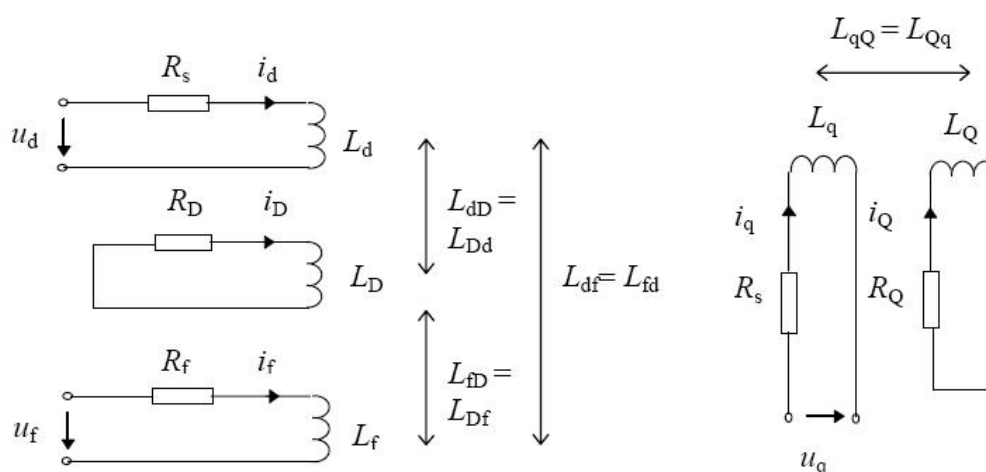
$$L_{Dc} = L_{cD} = L_{aDm} \cos(\vartheta + 2\pi/3)$$

$$L_{Qa} = L_{aQ} = -L_{aQm} \sin(\vartheta)$$

$$L_{Qb} = L_{bQ} = -L_{aQm} \sin(\vartheta - 2\pi/3)$$

$$L_{Qc} = L_{cQ} = -L_{aQm} \sin(\vartheta + 2\pi/3)$$

3.2-6



Obr. 3.2.1 Vazby mezi vinutími v podélné a příčné ose synchronního stroje[1].

Po dosazení rovnic uvedených výše, do původní rovnice (1.2-1) dostaneme soustavu rovnic s periodickými, časově proměnnými koeficienty. Pro zjednodušení můžeme rovnice pro magnetické toky transformovat do systému souřadnic D, Q které jsou pevně svázané s rotorem stroje.

Toto zjednodušení je vhodné použít z toho důvodu, že zatímco trojfázový stator je symetrický, rotor je nesymetrický – nachází se na něm budící vinutí protékané stejnosměrným budícím proudem a vinutí tlumící, které je spojené nakrátko, které má obecně jiné parametry v ose D a Q – viz obr. 3.2.1 .

Napěťové rovnice po transformaci do soustavy (d, q) vypadají takto:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q \quad 3.2-7$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d \quad 3.2-8$$

Pokud v našem případě figuruje nesymetrické napájení, musíme k rovnicím přidat ještě následující, a to pro nulovou složku.

$$u_0 = (u_a + u_b + u_c) / 3 = R_0 i_0 + \frac{d\Psi_q}{dt} = R_0 i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} \quad 3.2-9$$

Přičemž $R_0 = R_s$

Napěťové rovnice rotoru nebylo potřeba transformovat a mají tvar rovnice (3.2.0).

Tlumičí vinutí odpovídá rotoru nakrátko asynchronního motoru. Pro $\omega_k = \omega$ dostaneme:

$$0 = R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \quad 3.2.10$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d\Psi_f}{Dt} \quad 3.2.11$$

Budící vinutí v souřadném systému rotoru:

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \quad 3.2.12$$

Rovnice pro magneticky spřažené toky se po transformaci zjednoduší

$$\Psi_d = L_d i_d + L_{df} i_b + L_{dD} i_D \quad 3.2.12$$

$$\Psi_q = L_q i_q + L_{qQ} i_Q \quad 3.2.13$$

$$\Psi_f = L_f i_f + L_{fd} i_d + L_{fD} i_D \quad 3.2.14$$

$$\Psi_D = L_{Dd} i_d + L_{Df} i_f + L_D i_D \quad 3.2.15$$

$$\Psi_Q = L_{Qq} i_q + L_Q i_q + L_Q i_Q \quad 3.2.16$$

$$\Psi_0 = L_0 i_0 \quad 3.2.17$$

Nově zavedené indukčnosti jsou:

$$L_d = L_{a0} + L_{ab0} + \frac{3}{2}L_{m1} \quad 3.2.18$$

$$L_d = L_{a0} + L_{ab0} - \frac{3}{2}L_{m1} \quad 3.2.19$$

$$L_0 = L_{a0} - 2L_{ab0} \quad 3.2.20$$

$$L_{df} = L_{fd} = \sqrt{\frac{3}{2}}L_{afm} \quad 3.2.21$$

$$L_{dD} = L_{Dd} = \sqrt{\frac{3}{2}}L_{aDm} \quad 3.2.22$$

$$L_{qQ} = L_{Qq} = \sqrt{\frac{3}{2}}L_{aQm} \quad 3.2.23$$

K výše uvedeným rovnicím přibude vztah pro elektromagnetický moment a pohybová rovnice:

$$M_e = \frac{3}{2}p(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad 3.2.24$$

$$M_e - M_L = J_c \frac{d\Omega_m}{dt} \quad 3.2.25$$

$$\omega = p\Omega_m \quad 3.2.26$$

ω = elektrická rychlost rotoru

Ω_m = mechanická rychlost rotoru

p = počet pólů

Rovnice 3.2.7 až 3.2.26, které jsou použity z lit.[1], tvoří matematický model synchronního motoru v soustavě (d, q).

Kompletní řešení těchto rovnic je matematicky značně pracné, což by ale nebylo to nejhorší. Podstatnější je však to, že většinou nejsme schopni určit všechny parametry, a proto se téměř vždy používá pro určení model s poměrnými veličinami, ve kterém se tak vyskytují i poměrné parametry.

3.4. Matematický model synchronního motoru s budícím vinutím, vyniklými póly, a s tlumícím vinutím v poměrných veličinách.

Poměrné veličiny jsou veličiny vztažené na tzv. vztažné (bázové) hodnoty.

Volba vztažných hodnot pro stator vyplývá z volby koeficientu u Parkovy transformace souřadnic. Pro námi použitou transformaci (koeficient 2/3) je charakteristické, že je zachována amplituda veličin nikoli však výkonů. U výkonů je hodnota koeficientu $\alpha_B = \sqrt{2}$.

Po převedení rovnic v absolutních veličinách do rovnic v poměrných veličinách dostaneme:

Napěťové rovnice:

$$u_d = r_s i_q + \frac{1}{\Omega_B} \frac{d\Psi_d}{dt} - v \Psi_q \quad 3.3.27$$

$$u_q = r_s i_d + \frac{1}{\Omega_B} \frac{d\Psi_q}{dt} - v \Psi_d \quad 3.3.28$$

$$u_0 = r_0 i_0 + \frac{1}{\Omega_B} \frac{d\Psi_0}{dt} \quad 3.3.29$$

$$u_f = r_f i_f + \frac{1}{\Omega_B} \frac{d\Psi_f}{dt} \quad 3.3.30$$

$$0 = r_D i_D + \frac{1}{\Omega_B} \frac{d\Psi_D}{dt} \quad 3.3.31$$

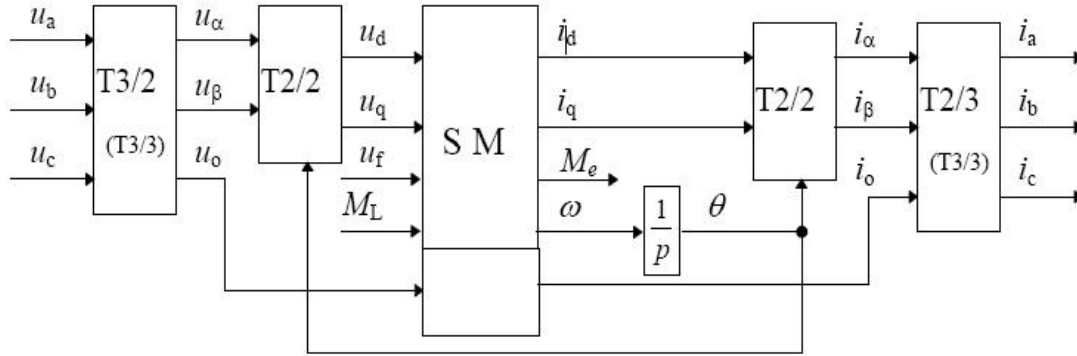
$$0 = r_Q i_Q + \frac{1}{\Omega_B} \frac{d\Psi_Q}{dt} \quad 3.3.32$$

v = poměrová úhlová rychlost

$$v = \frac{\omega}{\Omega_B} = p \frac{\Omega_m}{\Omega_B} \quad 3.3.33$$

Další rovnice pro magnetické zpražené toky jsou uvedeny v li.t [1]. Jakožto i ostatní rovnice, které jsou potřeba pro sestavení matematického modelu v poměrných veličinách.

Celkové řešení matematického modelu synchronního motoru včetně nesymetrického napájení je znázorněno v níže uvedeném blokovém schématu. Viz. Obr. 3.3.2



Obr. 3.3.2 Blokové schéma řešení synchronního motoru

SM – jedná se o blok, který obsahuje matematický model synchronního motoru v poměrných veličinách. Další součástí bloku je převod vstupních veličin v absolutních jednotkách na jednotky poměrné.

Dále jsou ve schématu obsaženy bloky transformace, které jsou sestaveny dle rovnic viz [1].

3.5. Matematický model synchronního motoru se zanedbáním elektromagnetických dějů.

Níže uvedený matematický model platí pro harmonické napájení, resp. pro základní harmonickou. Podle literatury [6] platí pro elektromagnetický moment následující rovnice, ze které je následně i vycházeno při tvorbě matematického i simulačního modelu použitého při simulaci v prostředí Simulinku.

$$M_e = \frac{3}{\omega_s} p \left[\frac{U U_{if}}{X_d} \sin \theta_L + \frac{U^2}{2 X_d X_q} (X_d - X_q) \sin 2\theta_L \right] \quad 3.4.34$$

$$\text{Efektivní hodnota fázového statorového napětí } U = U_m / \sqrt{2} \quad 3.4.35$$

$$X_d = \omega_s L_d \quad X_q = \omega_s L_q \quad 3.4.36 - 37$$

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad 3.4.38$$

$$U_{i_f} = \omega_s \Psi_{fef}$$

U_{i_f} = Efektivní fázová hodnota indukovaného napětí

Po úpravě výše uvedených rovnic můžeme vyjádřit elektromagnetický moment stroje v rovnici:

$$M_e = F_1(\omega_s, p_p, U, \Psi_{fef}, L_d, L_q) \sin \theta_L + F_2(\omega_s, p_p, U, L_d, L_q) \sin 2\theta_L \quad 3.4.39$$

$$M_e - M_L = J_c \frac{d\Omega_m}{dt} \quad 3.4.40$$

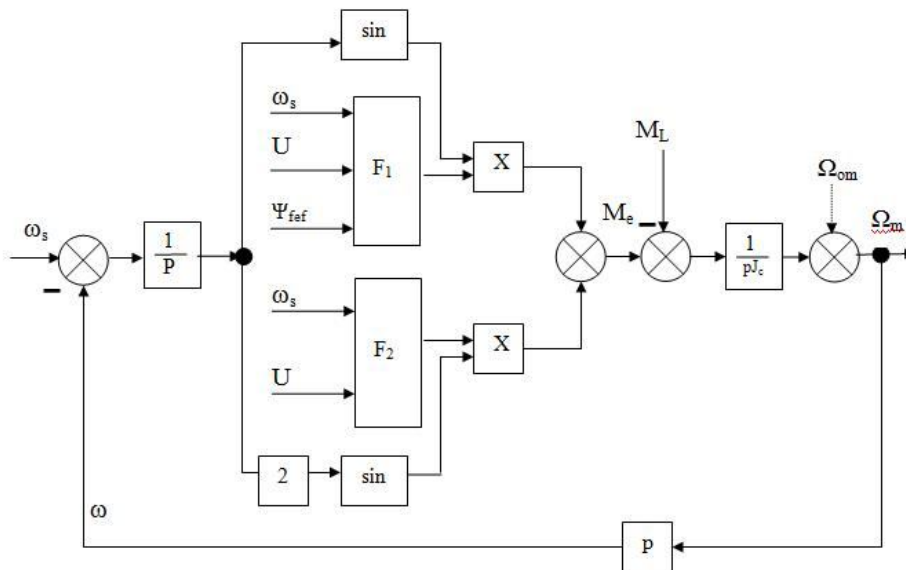
$$\omega = p\Omega_m$$

Výše uvedené rovnice jsou základem pro sestavení matematického modelu synchronního motoru se zanedbanými elektromagnetickými ději. Což značnou mírou přispělo ke zjednodušení celého matematického modelu. Zásadní zjednodušení je zapříčiněno nepotřebnými transformačními bloky a sledováním elektromagnetických složek.

Níže uvedený model je model pro obecný synchronní motor, v případě potřeby je potřeba brát zřetel na následující podmínky:

$U_{i_f} = 0$ pokud se jedná o motor s permanentními magnety nebo reluktanční.

$X_d = X_q$ pokud se jedná o motor s hladkým rotorem.



Obr. 3.4.3 Blokové schéma motoru se zanedbáním elektromagnetických dějů.

4. Sestavení modelu pohonu se synchronním motorem bez uvažování elektromagnetických dějů.

Kapitoly sestavování matematického modelu a modelu k simulačnímu ověření byly spojeny v jednu. Matematický model motoru je odvozen v kapitole 3.4 v níž je také blokové schéma obr.3.4.3 podle něho je sestaven simulační model motoru v programu Matlab – simulink.

4.1 Použitý software

Pro sestavení modelu motoru i celého regulovaného pohonu byl použit jeden z nejvýznamnějších programů v této oblasti a to Matlab – Simulink. Jedná se o komplexní program pro návrh a simulace jednotlivých dějů. V této práci bylo použito více verzí tohoto program. Nižší verze nepokryla všechny potřebné bloky, proto byla použita i verze 7.1.

4.1.1 Matlab – seznámení s možnostmi prostředí

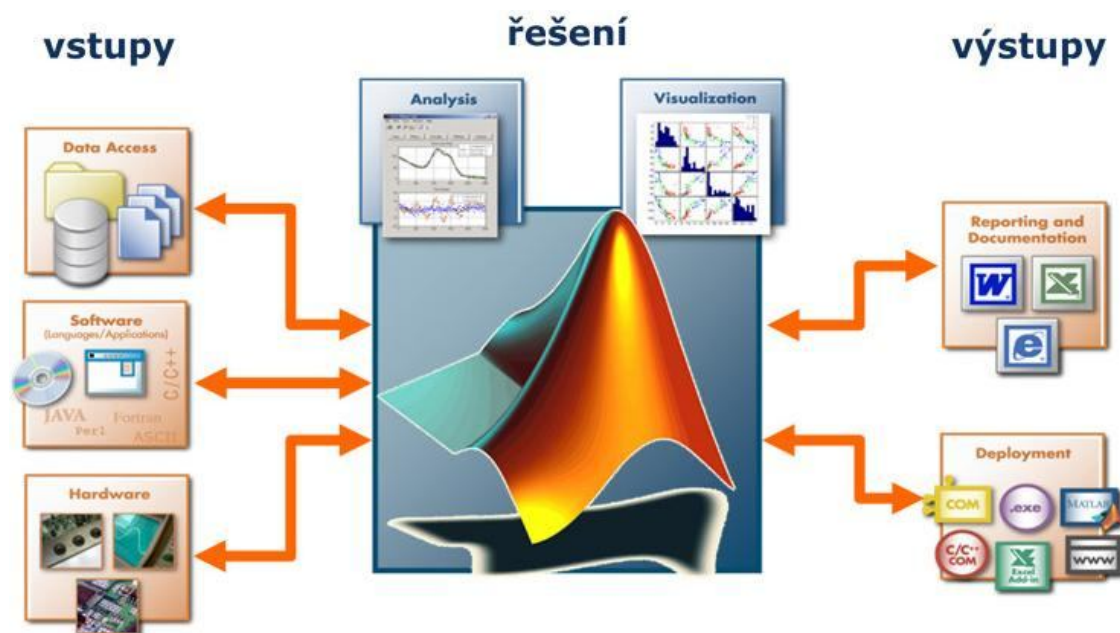
Matlab je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, paralelní výpočty, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. MATLAB je nástroj pro pohodlnou interaktivní práci, i pro vývoj širokého spektra aplikací.

Výpočetní systém Matlab se během uplynulých let stal celosvětovým standardem v oblasti technických výpočtů a simulací ve sféře vědy, výzkumu, průmyslu i v oblasti vzdělávání.

Matlab poskytuje svým uživatelům nejen mocné grafické a výpočetní nástroje, ale i rozsáhlé specializované knihovny funkcí spolu s výkonným programovacím jazykem čtvrté generace. Knihovny jsou svým rozsahem využitelné prakticky ve všech oblastech lidské činnosti.

Díky své architektuře je Matlab určen zejména těm, kteří potřebují řešit početně náročné úlohy a přitom nechtějí nebo nemají čas zkoumat matematickou podstatu problému. Více než milión uživatelů po celém světě, využívá možnosti jazyka Matlabu, který je mnohem jednodušší než například Fortran nebo C a který skýtá obrovský potenciál produktivity a tvořivosti. Za nejsilnější stránku Matlabu je považováno mimořádně rychlé výpočetní jádro s optimálními algoritmy, které jsou prověřeny léty provozu na špičkových pracovištích po celém světě. Matlab byl implementován na všech významných platformách (Windows, Linux, Solaris, Mac). [3].

Program umožňuje používat celou řadu vstupů a výstupů dle naší potřeby. Struktura vstupů a výstupů je orientačně naznačena na obr. 4.1.4

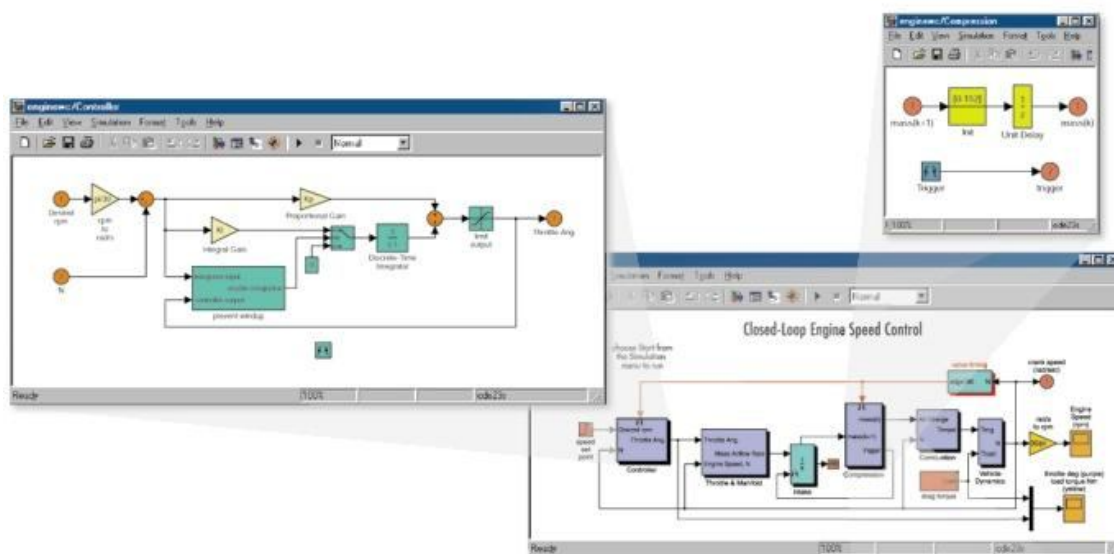


Obr. 4.1.4 Ukázka struktury vstupu a výstupu programu MATLAB

4.1.2 Simulink

Simulink je nadstavba Matlabu pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy Matlabu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Poskytuje uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic.

Kromě standardních úloh dovoluje Simulink rychle a přesně simulovat i rozsáhlé "stiff" systémy s efektivním využitím paměti počítače. Pomocí Simulinku a jeho grafického editoru lze vytvářet modely lineárních, nelineárních, v čase diskretních nebo spojitých systémů pouhým přesouváním funkčních bloků myší. Simulink také umožňuje spouštět určité části simulačního schématu na základě výsledku logické podmínky. Tyto spouštěné a povolované subsystémy umožňují použití programu v náročných simulačních experimentech. Samozřejmostí je otevřená architektura, která dovoluje uživateli vytvářet si vlastní funkční bloky a rozšiřovat již tak bohatou knihovnu Simulinku. Hierarchická struktura modelů umožňuje koncipovat i velmi složité systémy do přehledné soustavy subsystémů prakticky bez omezení počtu bloků. Simulink, stejně jako Matlab, dovoluje připojovat funkce napsané uživateli v jazyce C. Vynikající grafické možnosti Simulinku je možné přímo využít k tvorbě dokumentace. Mezi neocenitelné vlastnosti Simulinku patří nezávislost uživatelského rozhraní na počítačové platformě. Přenositelnost modelů a schémat mezi různými typy počítačů umožňuje vytvářet rozsáhlé modely, které vyžadují spolupráci většího kolektivu řešitelů na různých úrovních.[3]



Obr. 4.1.5 Ukázka prostředí programu SIMULINK

4.2 Sestavení simulačního modelu synchronního motoru dle rovnic 3.4.34 – 40.

Model v programu matlab simulink vychází z blokového schématu viz obr. 3.4.3, model plně koresponduje s rovnicí pro elektromagnetický moment 3.4.34. Tato rovnice se stala také základem struktury, na jejíchž základě byly sestaveny v modelu bloky F1 a F2

Parametry motoru pro modelování a simulaci byly zvoleny dle lit.[1]. Jedná se o motor s permanentními magnety a hodnoty motoru byly stanoveny dle doporučení vedoucího diplomové práce takto:

$$P_n = 890 \text{ W}$$

$$M_n = 17 \text{ Nm}$$

$$p = 3$$

$$n_{\max} = 2000 \text{ ot/min}$$

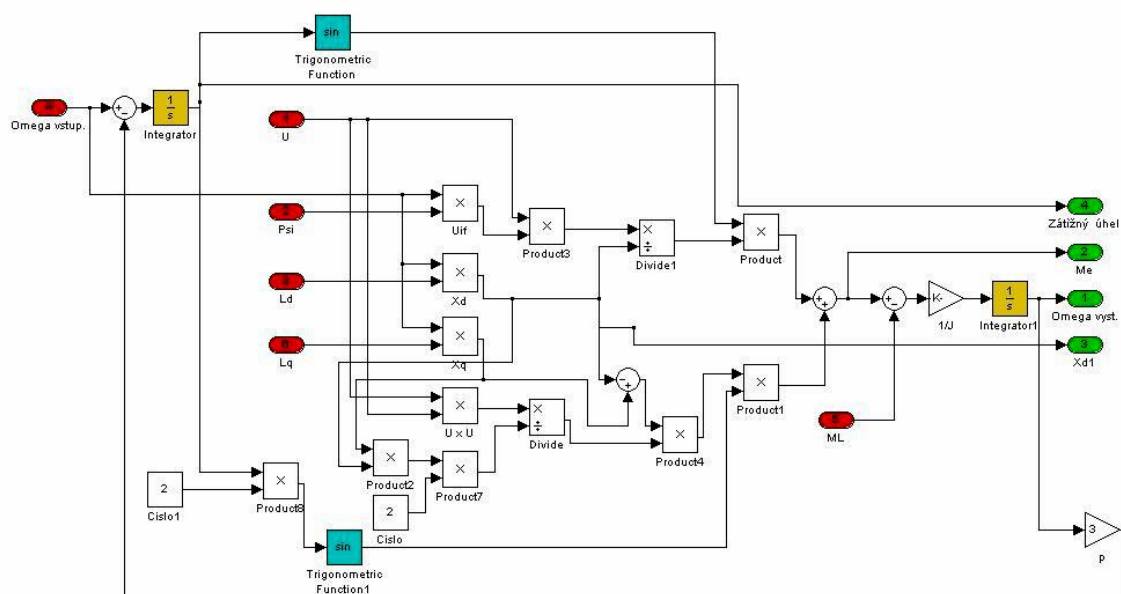
$$\Psi_f = 0,378 \text{ Wb}$$

$$J_m = 0,00104 \text{ kgm}^2$$

$$U_{sn} = 78/45 \text{ V}$$

$$L_d = L_q = 1,29 \text{ mH} - \text{indukčnost v podélné a příčné ose}$$

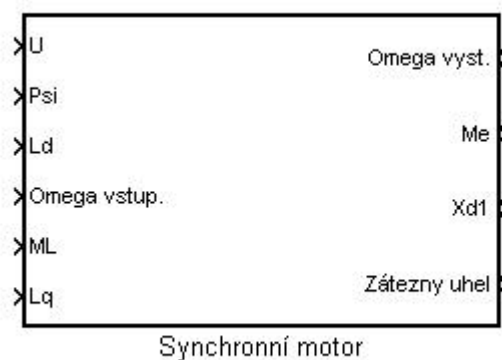
Za pomoci výše uvedených údajů byl sestaven model na obr. 4.2.6, tyto hodnoty byly použity při simulaci celkového pohonu, která bude následovat.



Obr.4.2.6 – Schéma modelu synchronního motoru z programu MATLAB Simulink

Na obrázku jsou vstupy (zadávané hodnoty) označeny červenou a výstupy zelenou barvou. Žlutou barvou jsou označeny dva integrační bloky, a tyrkysová označuje bloky trigonometrické funkce sinus. Toto schéma je stále pouze model synchronního motoru.

Pro další sestavování pohonu byl model motoru značně složitý a nepřehledný. Tento fakt přispěl k náhradě schématu motoru subsystémem, který obsahuje přesnou strukturu uvedenou na obr.4.2.6 a jsou z něho vyvedeny pouze potřebné vstupy a výstupy.



Obr.4.2.7 Blok synchronního motoru

4.3 Návrh a sestavení regulátoru rychlosti pro synchronní motor

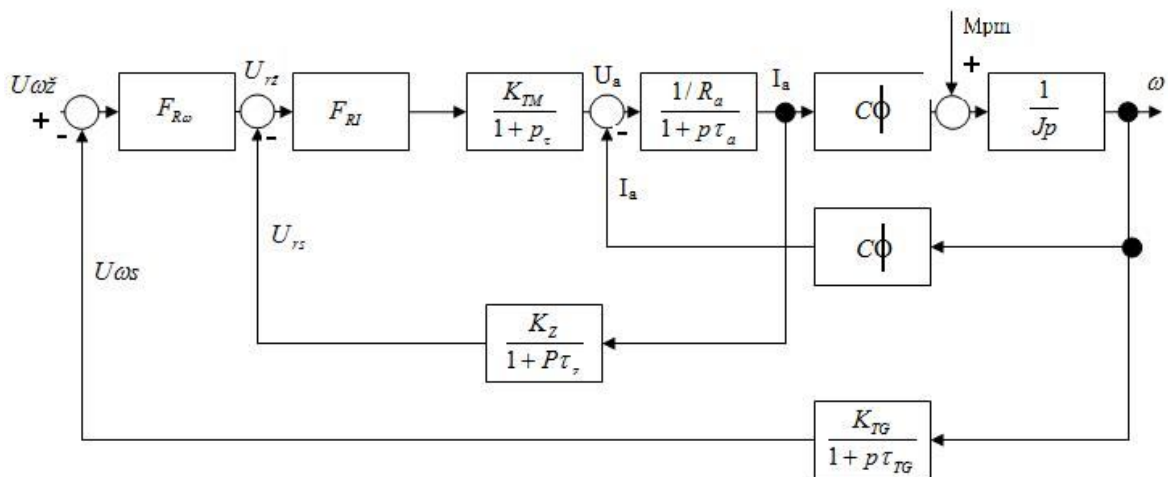
Návrh a realizace včetně výpočtu parametrů regulátoru nebyly u simulovaného modelu prováděny. Tento fakt byl zapříčiněn využitím hotového bloku PI regulátoru, který nabízí program Matlab Simulink. Nastavení – výpočet byl nastaven metodou pokusu a hledáním nejlepších kombinací zesílení. Samotné doladění bylo provedeno podprogram PID Regulation Tuner, který je k dispozici ve vyšších verzích programu Matlab Simulink.

Vzhledem k tomu, že samotný návrh regulátoru není obsažen v tvorbě modelu, uvedu níže alespoň některé struktury a způsoby návrhu regulátorů i celé struktury. Regulace uvedena níže se používá u synchronních motorů se zanedbáním elektromagnetických dějů, ale také bez zanedbání těchto dějů.

4.4 Regulace rychlosti

4.4.1 Regulace rychlosti s podřadnou smyčkou proudu

Regulační obvod proudu je proto součástí regulace. Regulační smyčka proudu značně ovlivní regulovaný průběh a je v regulaci pro průmyslové použití velmi důležitým prvkem. Zakomponování regulační smyčky proudu můžeme vidět na obr. 4.8. V regulované struktuře uvažujeme využití signálu z tachogenerátoru, který je filtrován s časovou konstantou τ_{TG} .

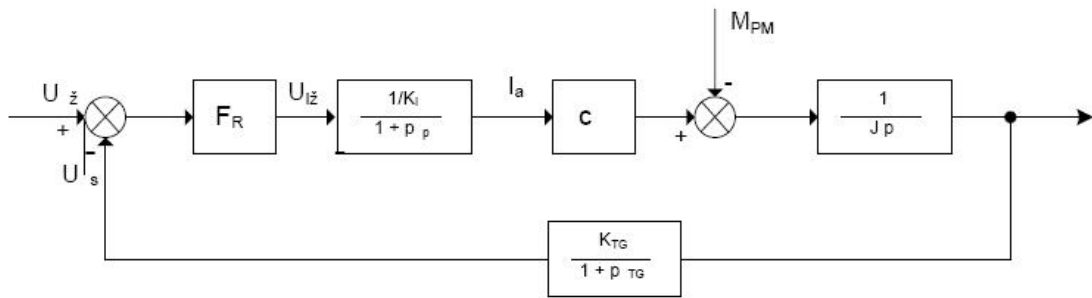


Obr. 4.8 Struktura regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu

Podřízený regulační obvod proudu aproximuje na setrvačný člen:

$$F_{KI} = \frac{1/K_I}{1 + p\tau_p}$$

Kde τ_p je náhradní časová konstanta pro proudovou smyčku. Pro metodu Optimálního modulu: $\tau_p = 2(\tau_{TM} + \tau_1)$. Pro metodu Symetrického optima je to pak : $\tau_p = 4(\tau_{TM} + \tau_1)$. Z výše uvedených konstatování lze proto sestavit zjednodušené schéma , které vidíme na obrázku 4.9.[2]



Obr. 4.9 Zjednodušené blokové schéma [2]

Přenos soustavy:

$$F_{s\omega}(p) = \frac{1/K_I}{(1 + p\tau_p)} \frac{Co}{pJ} \frac{K_{TG}}{(1 + p\tau_{TG})} = \frac{K_{s\omega}}{p(1 + p\tau_{s\omega})}$$

Kde zesílení soustavy je poté : $K_{s\omega} = \frac{1}{K_I} \frac{Co}{J} K_{TG}$

Součtová konstanta $\tau_{s\omega} = \tau_p + \tau_{TG}$

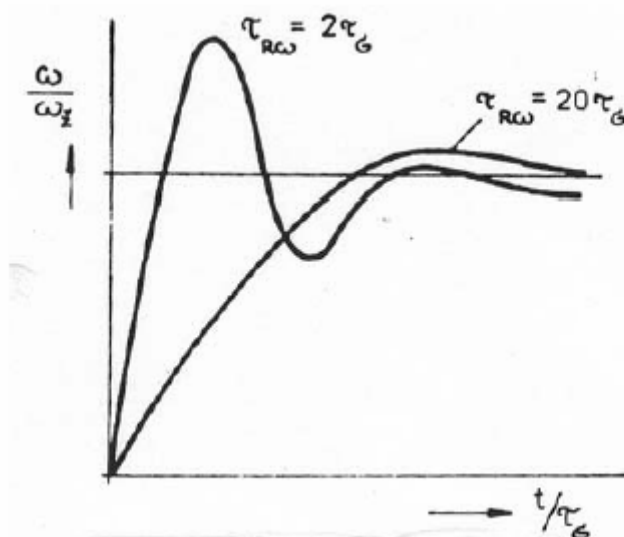
Na základě rovnic uvedených výše, můžeme přistoupit k optimalizaci přenosu.[2]

Pokud provedeme optimalizaci dle OM vychází nám regulátor typu P s přenosem:[2]

$$F_{R\omega}(p) = \frac{F_{0\omega}(p)}{F_{s\omega}(p)} = \frac{1}{\frac{2p\tau_{s\omega}(1 + p\tau_{s\omega})}{K_{s\omega}}} = \frac{1}{2K_{s\omega}\tau_{s\omega}p}$$

Pokud ale provedeme optimalizaci dle SO, vychází nám regulátor typu PI s přenosem:[2]

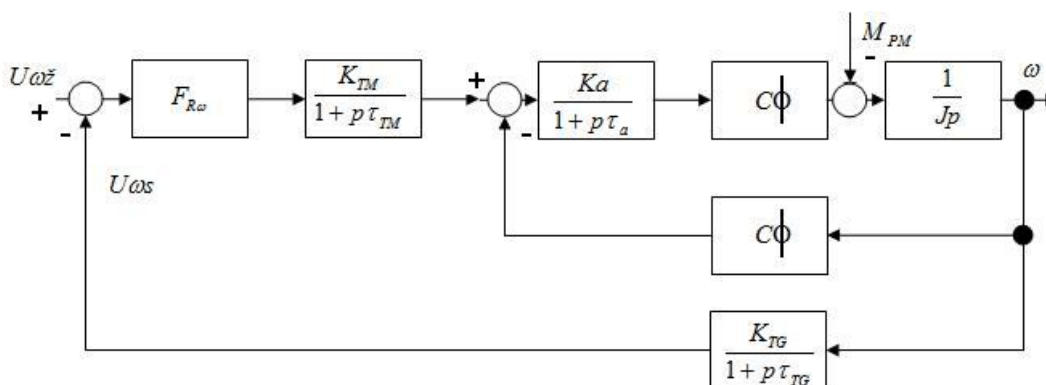
$$F_{R\omega}(p) = \frac{F_{0\omega}(p)}{F_{s\omega}(p)} = \frac{(1 + p4\tau_{\sigma\omega})}{\frac{2p\tau_{\sigma\omega}(1 + p\tau_{\sigma\omega})}{K_{S\omega}}} = \frac{1}{2K_{S\omega}\tau_{\sigma\omega}} \frac{(1 + p4\tau_{\sigma\omega})}{p4\tau_{\sigma\omega}} = K_{R\omega} \frac{(1 + p\tau_{R\omega})}{p\tau_{R\omega}}$$



Obr. 4.10a – Vliv změny časové konstanty na přechodovou charakteristiku [1]

4.4.2 Regulace rychlosti bez podřazené smyčky proudu

Tato regulace se užívá u speciálních motorů, které vydrží velké proudové přetížení. Mezi známe typy patří (Minertia, Servalo). Jedná se o servomotory, které jsou buzeny permanentními magnety a proto bez problému vydrží proudové přetížení i 10In. Tyto motory již mají většinou zabudovaný senzor otáček (tachodynamo, IRC čidlo), který je základním prvkem zpětné vazby během regulace. Následující blokové schéma nám naznačuje blokovou strukturu regulace bez podřadné smyčky proudu.



Obr. 4.10.b Blokové schéma regulace rychlosti bez podřazené smyčky proudu

Přenos soustavy

$$F_{s\omega}(p) = F_{TM} F_M F_{TG} = \frac{K_{TM}}{(1 + p\tau_{TM})} \frac{1/C\phi}{(1 + pT_m + p^2 T_m T_{ac})} \frac{K_{TG}}{(1 + p\tau_{TG})}$$

FM je přenos motoru. Pokud uvažujeme $T_m \gg T_{ac}$ se zavedením malé časové konstanty můžeme soustavu zjednodušit na tvar:

$$F_{s\omega}(p) = \frac{K_{s\omega}}{(1 + p\tau_{s\omega})(1 + pT_m)(1 + pT_{ac})}$$

kde zesílení soustavy $K_{s\omega} = K_{TM} \frac{1}{C\phi} K_{TG}$

K určení parametrů regulátorů rychlosti použijeme metodu Optimálního modulu a Symetrického optima. Za použití Optimálního modulu dostaneme přenos regulátoru:

$$F_{R\omega}(p) = \frac{F_{0\omega}(p)}{F_{s\omega}(p)} = \frac{\frac{1}{2p\tau_{s\omega}(1 + p\tau_{s\omega})}}{\frac{K_{s\omega}}{(1 + p\tau_{s\omega})(1 + pT_m)(1 + pT_{ac})}} = \frac{T_m}{2K_{s\omega}\tau_{s\omega}} \frac{(1 + pT_m)(1 + pT_{ac})}{pT_m}$$

Výsledkem je PID regulátor se zesílením $KR\omega = \frac{T_m}{2K_{s\omega}\tau_{s\omega}}$

5.1.1 Popis jednotlivých bloků modelu

Na obrázku 5.12 jsou barevně rozlišeny jednotlivé bloky. Níže se pokusím uvést dle barevného rozlišení funkci jednotlivých bloků.

Modré – proměnné vstupní hodnoty - jedná se o vstupní bloky, díky nimž jsou měněny požadované parametry. První blok zastupuje vstupní hodnotu žádaných otáček. Druhý blok modré barvy s označením ML umožňuje volit požadovaný moment zátěže, která byla připojena až po roztočení motorů na požadované otáčky.

Oranžové – převodníky – jedná se bloky, které umožňují vstupu transformaci požadovaných otáček na úhlovou rychlost, která je potřebná pro zadávání vstupní hodnoty do samotného motoru. Druhý blok této barvy je připojen na výstupu s bloku motoru a provádí opětovný převod úhlové rychlosti na výstupní otáčky v zadaných parametrech. Bloky jsou založené na známe rovnici: $\omega = 2\pi f$

Červené – konstantní hodnoty – jedná se o bloky vstupních hodnot, které obsahují základní neměnné parametry motoru. Tyto parametry byly nastaveny na požadované hodnoty a během simulace byly neměnné.

Tyrkysová – motor - jedná se o blok samotného synchronního motoru. Vnitřní struktura je téměř shodná jako na obr. 4.2.6. Byly pouze upraveny polohy jednotlivých bloků pro lepší zobrazení obrázku v této práci.

Zelené – graf - Jedná se o bloky připojené na výstupní svorky. Jsou to pouze zobrazovače jednotlivých průběhů.

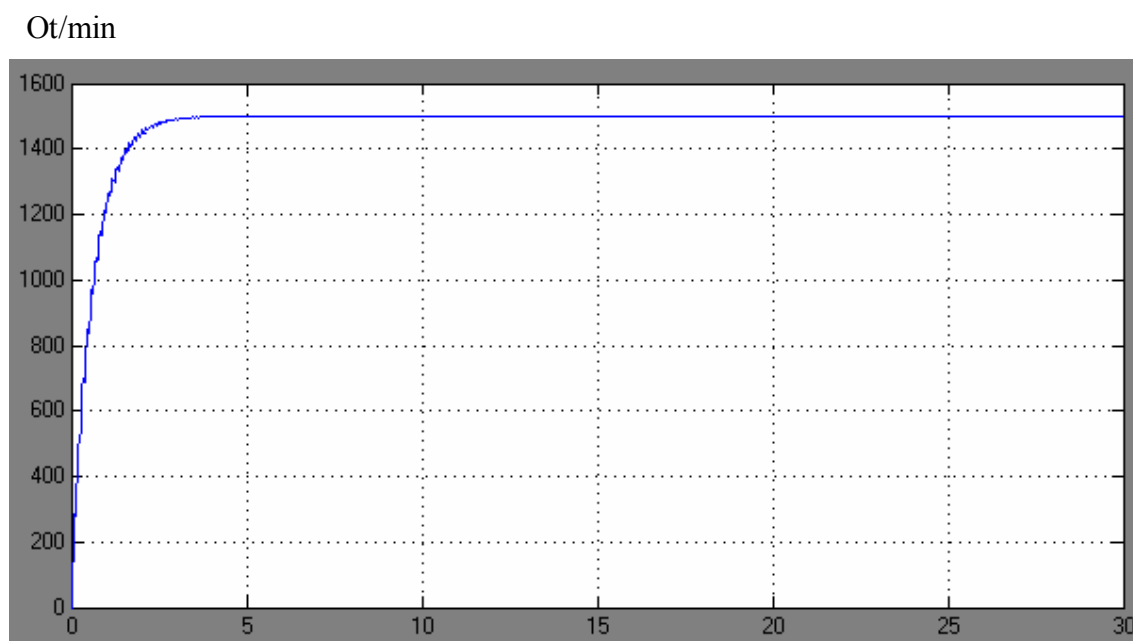
Šedé – bloky regulace – tyto bloky jsou základem regulace, které ale musely být posléze ještě doplněny o blok omezení. Tento blok bohužel není zobrazen ve struktuře.

5.2 Simulace pohonu bez připojení momentu zátěže s konstantní hodnotou otáček.

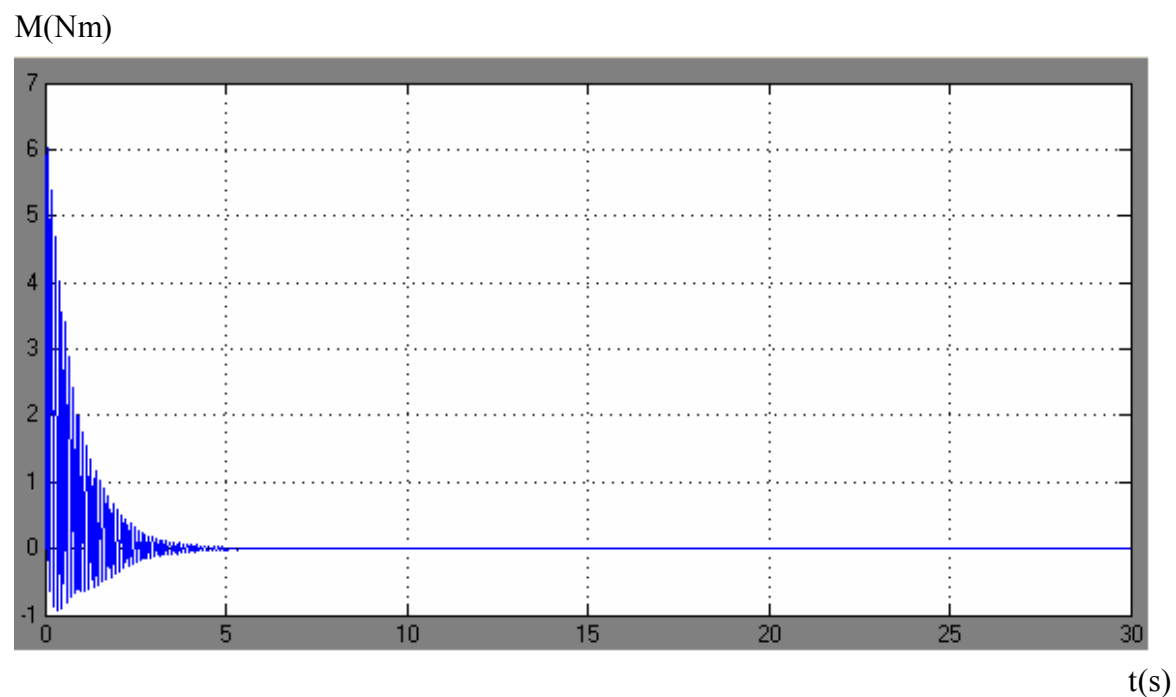
Jedná se o simulační ověření vlastností motoru bez připojené zátěže. Jedná se o motor jehož model je zobrazen na obr. 4.2.6. Motor použit v regulační struktuře spolu s regulací založené na PI regulátoru.

Mezi parametry motoru uvedených výše je parametr $L_d = L_q$, to znamená, že indukčnosti v obou osách jsou si rovny. Pokud tuto skutečnost zahrneme do vzorce 3.4.34 zjistíme, že jedná ze dvou hlavních složek momentu je nulová, což se projeví i ve výsledných zobrazeních.

Na obrázku 5.13 vidíme průběh skutečných otáček při zadaných otáčkách 1500ot / min. Otáčky byly zadány konstantní hodnotou.

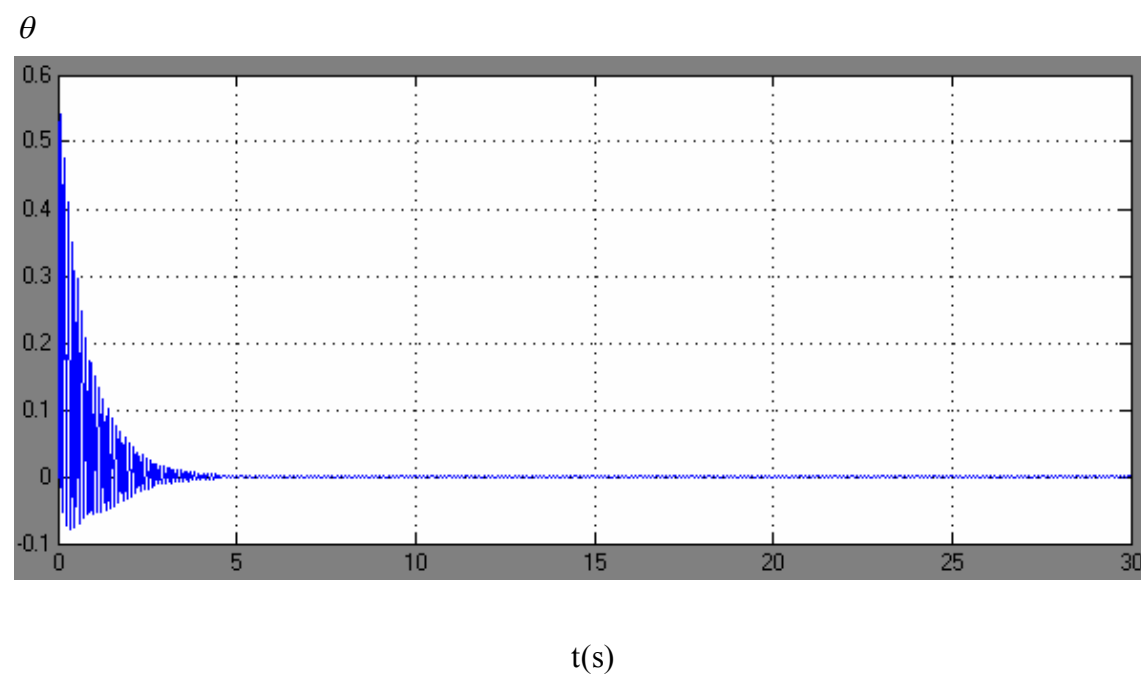


Obr. 5.13 Průběh skutečných otáček motoru



Obr. 5.14 Průběh Elektrického momentu

Na obrázku 5.14 vidíme průběh elektrického momentu. Vzhledem k tomu, že motor není v této simulaci nijak zatížen se výsledný moment po rozběhu na zadané otáčky ustálí na nulové hodnotě.



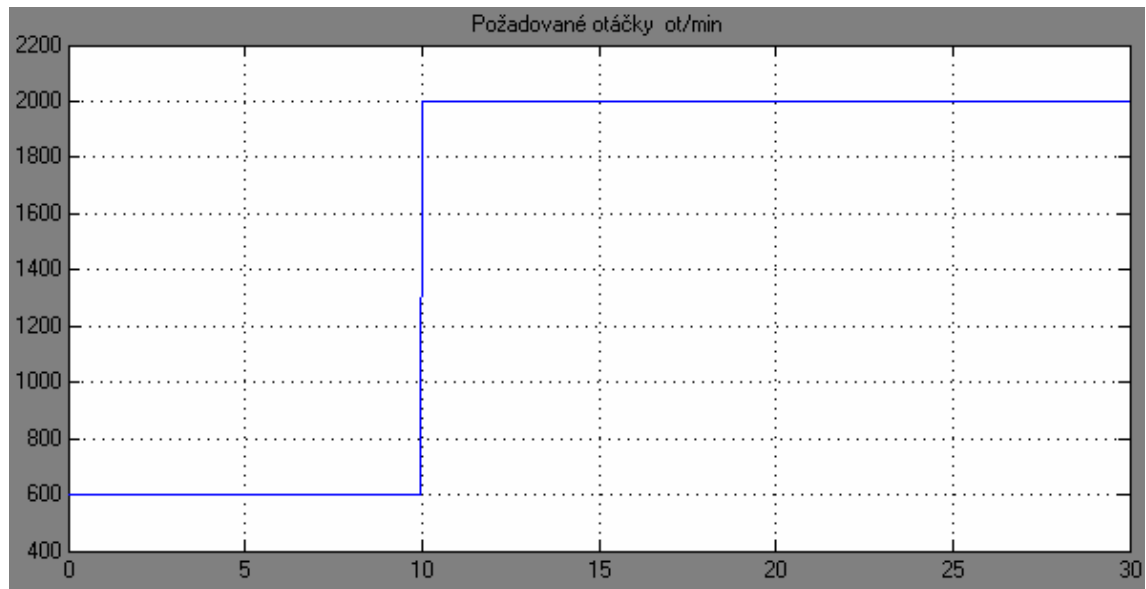
Obr. 5.15 Průběh zatěžovacího úhlu

Na obr. 5.15 můžeme vidět průběh zatěžovacího úhlu. Jedná se veličinu, která vstupuje do bloku Sin. viz. obr. 4.2.6

5.3 Simulace synchronního pohonu bez zátěže s reakcí na skokovou změnu otáček.

Jedná se o simulaci motoru stejných parametrů, ale požadované otáčky se v čase $t=10\text{s}$ skokově mění z hodnoty 600 ot/min. na hodnotu 2000 ot/min.

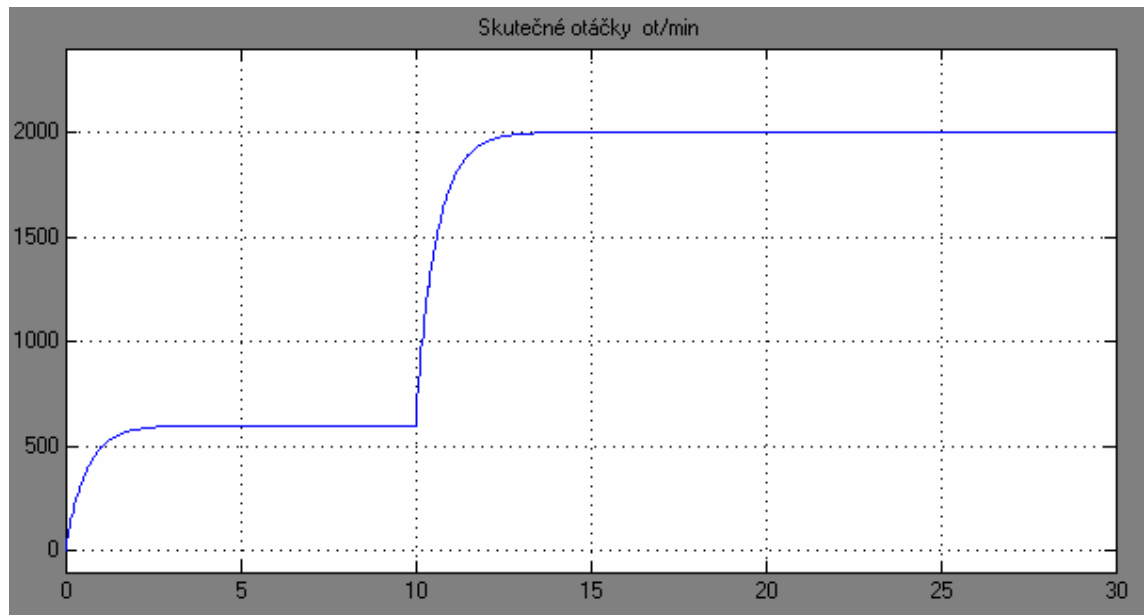
Ot/min



t(s)

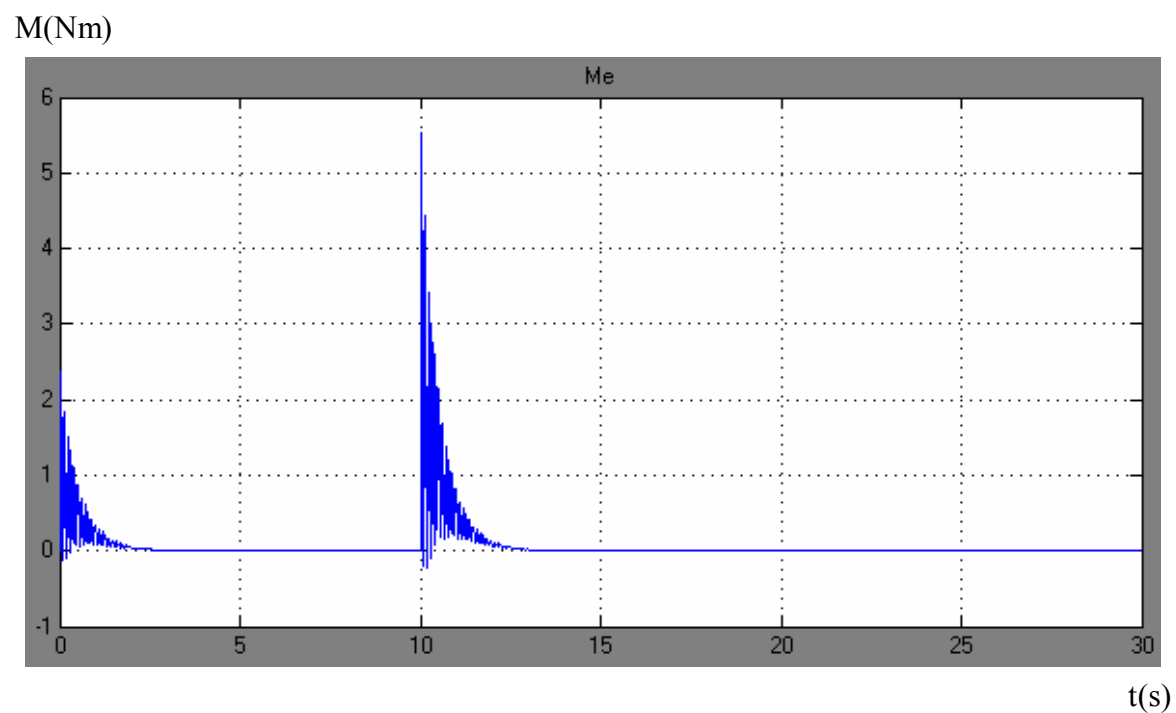
Obr. 5.16 Průběh požadované skokové změny otáček

Ot/min



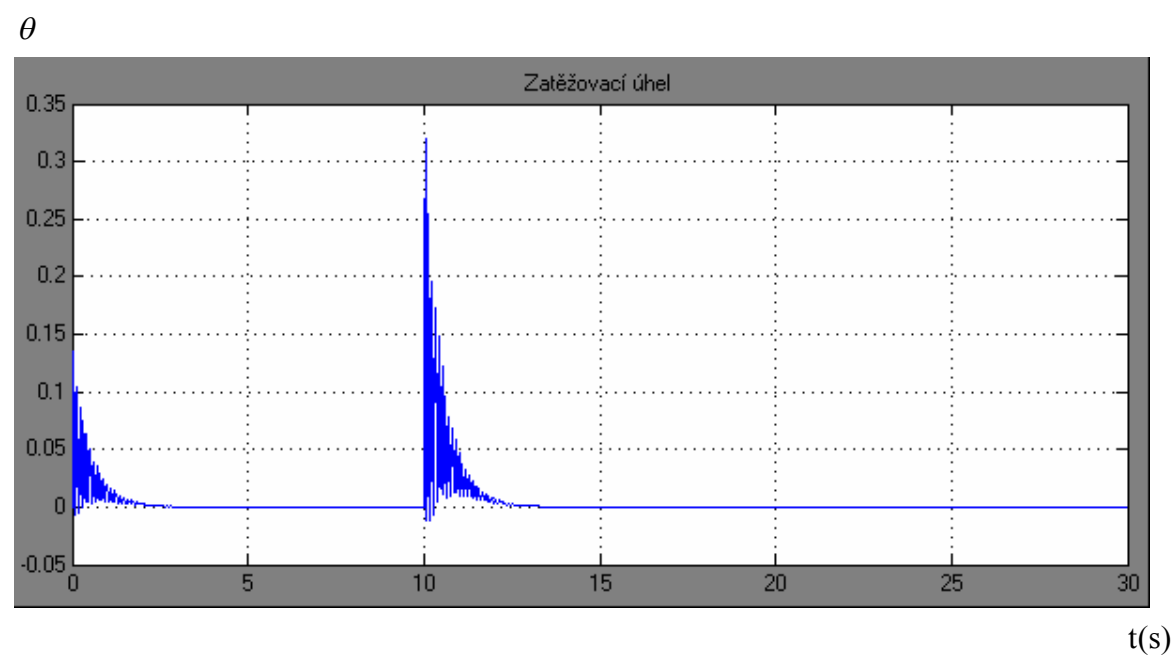
t(s)

Obr.5.17 Průběh výsledných otáček po reakci na skokovou změnu



Obr. 5.18 Průběh momentu k reakci na skokovou změnu otáček

Na obrázku 5.18 můžeme zřetelně vidět reakci momentu na skokovou změnu. Poměr velikosti momentu odpovídá poměru velikostí skokové změny otáček.

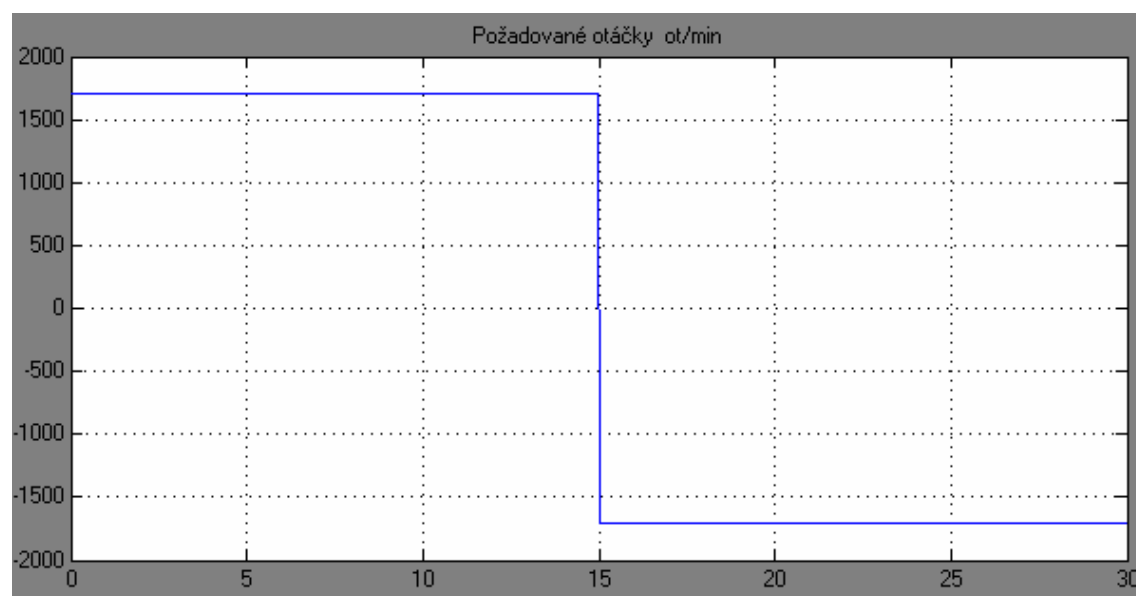


Obr. 5.19 Průběh zatěžovacího úhlu v reakci na skokovou změnu

5.4 Simulační ověření reakce pohonu na reverzaci.

V této části jsou vyobrazeny jednotlivé průběhy v reakci na reverzaci. Jedná se o reverzaci pohonu při požadované hodnotě otáček 1700 ot/min.

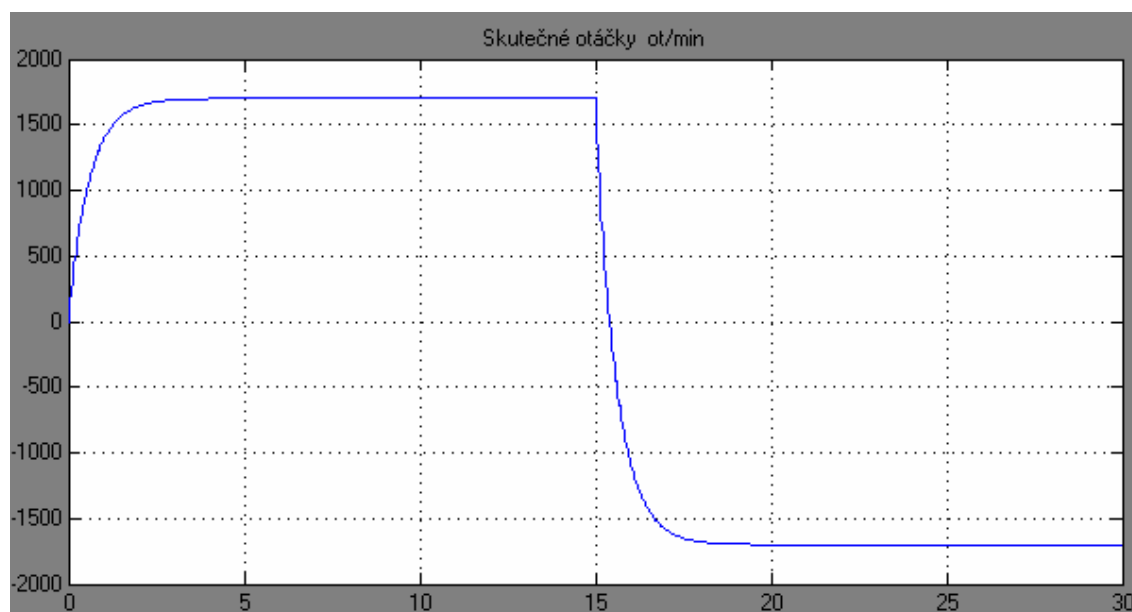
Ot/min



t(s)

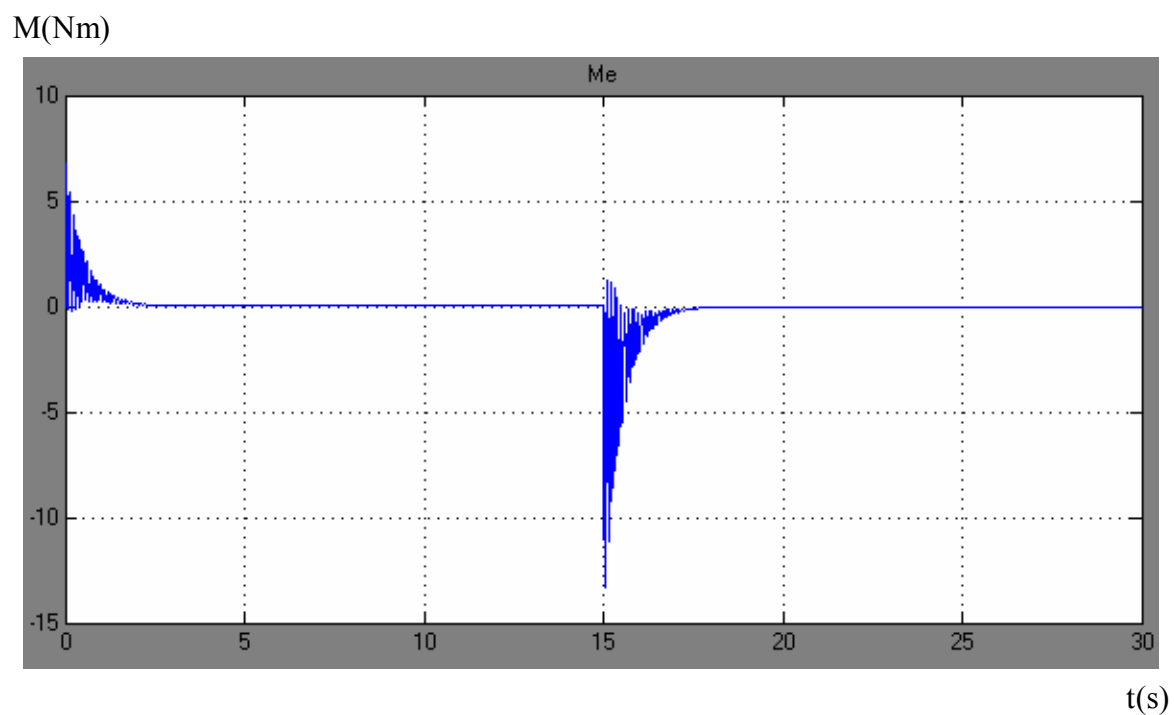
Obr.5.20 Požadovaný průběh reverzace otáček

Ot/min



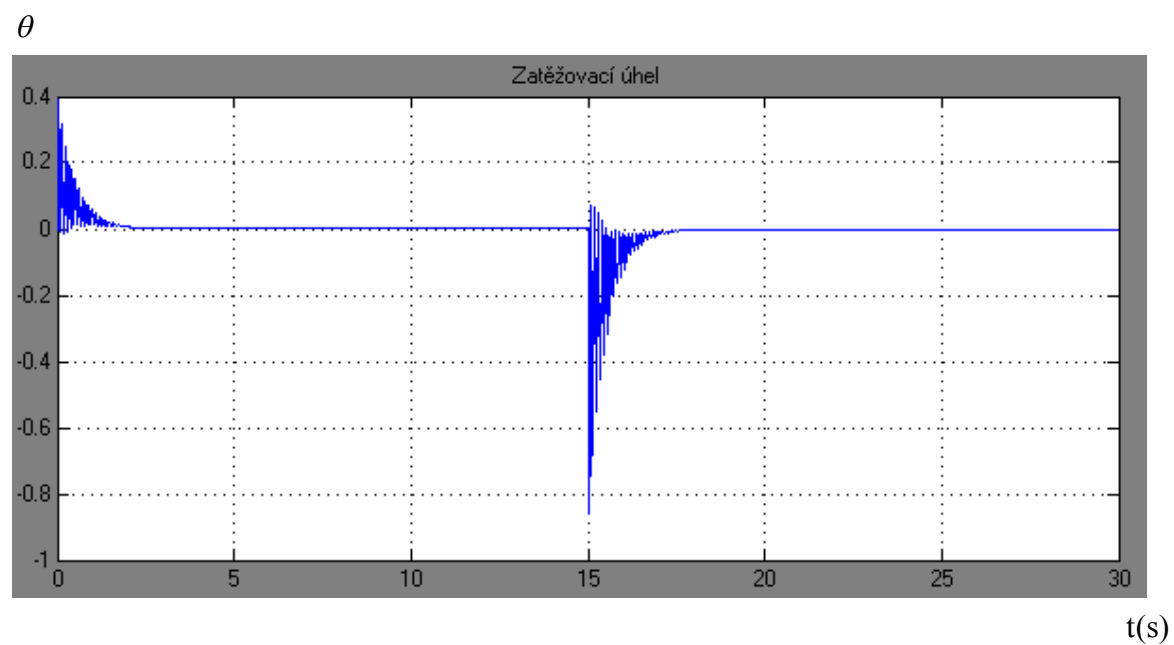
t(s)

Obr.5.21 Průběh skutečných otáček při reverzaci



Obr.5.22 Průběh výsledného momentu

Na obrázku 5.22 vidíme průběh výsledného momentu. Moment v čase reverzace odpovídá cca dvojnásobku rozběhového momentu, což je v souladu s teoretickým předpokladem.

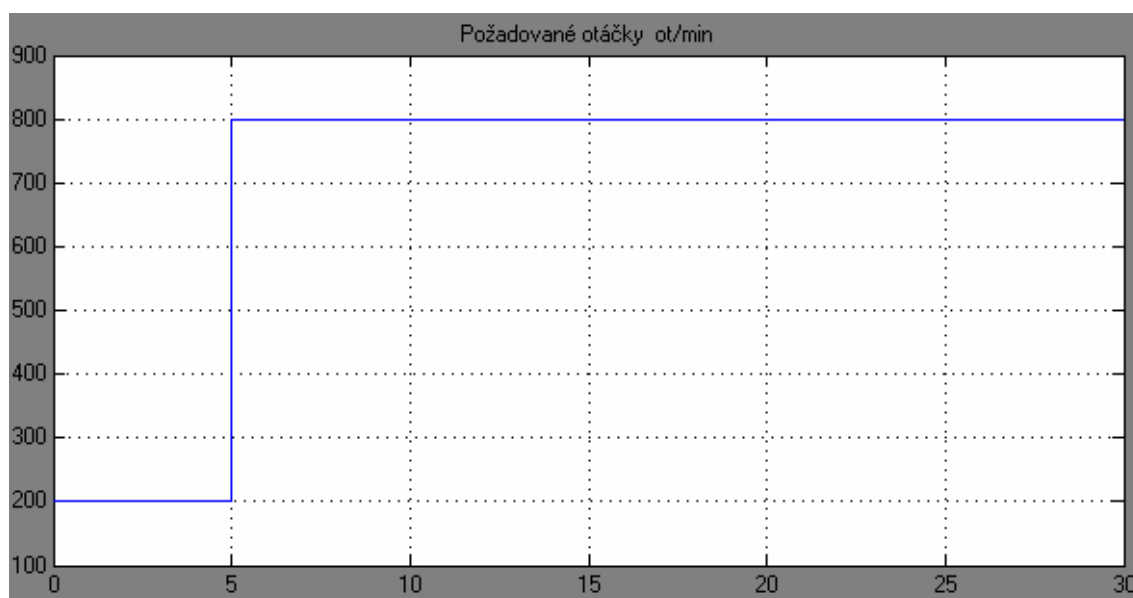


Obr. 5.23 Průběh zatěžovacího úhlu při reakci na rozběh a reverzaci

5.5 Simulační ověření reakce pohonu na připojenou zátěž

V této části jsem se zaměřil na připojení zátěžného momentu v době $t=15\text{s}$. Rozběh je proveden opět skokovou změnou otáček.

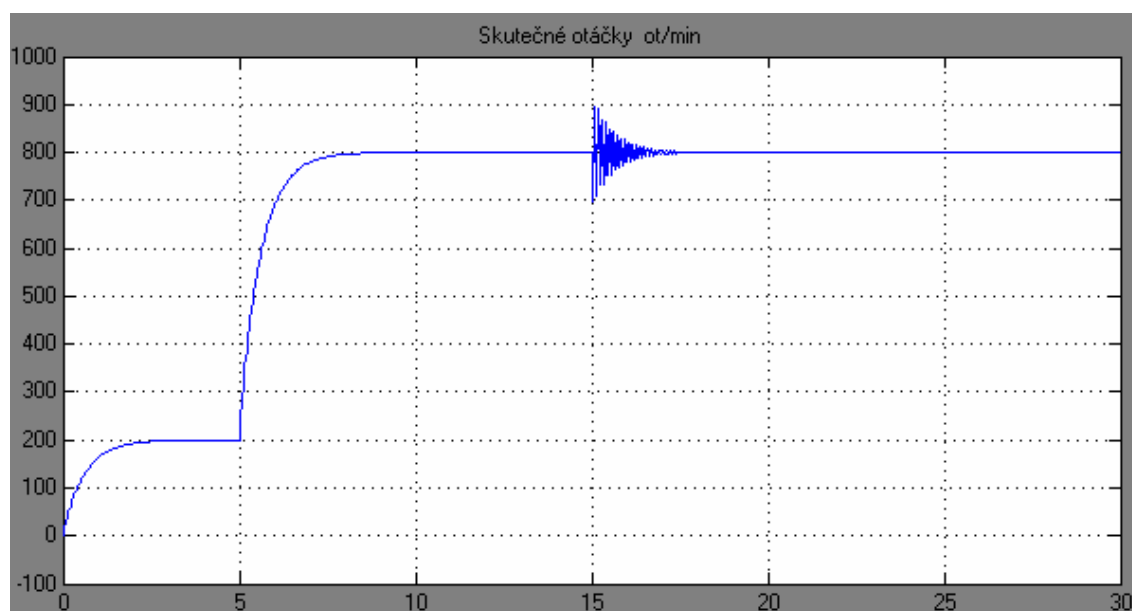
Ot/min



t(s)

Obr. 5.24 Požadovaný průběh otáček

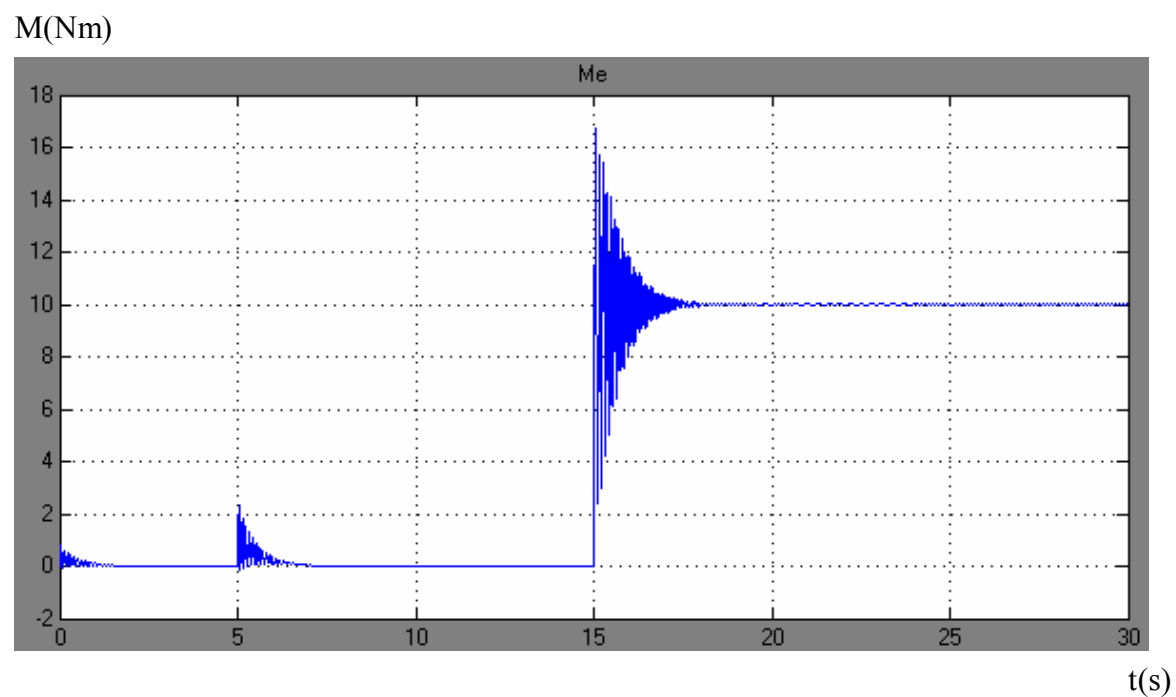
Ot/min



t(s)

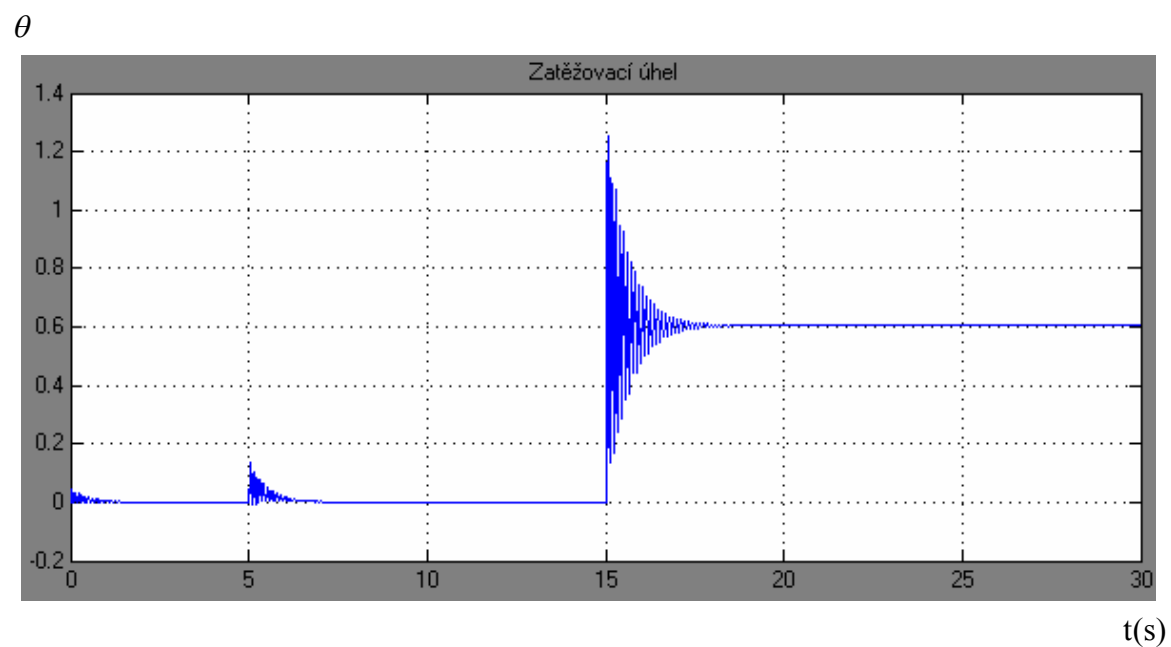
Obr. 5.25 Skutečný průběh otáček

Na obrázku 5.25 vidíme reakci otáček na připojený zátěžný moment v čase $t=15$. Výsledek potvrdil, že se připojení zátěže lehce projeví i zakolísáním otáček.



Obr.5.26 Reakce celkového momentu na připojení zátěže

Jelikož byla zátěž v simulaci připojena skokem je nárůst momentu jak vidíme v grafu velmi razantní a odpovídá předpokladu.

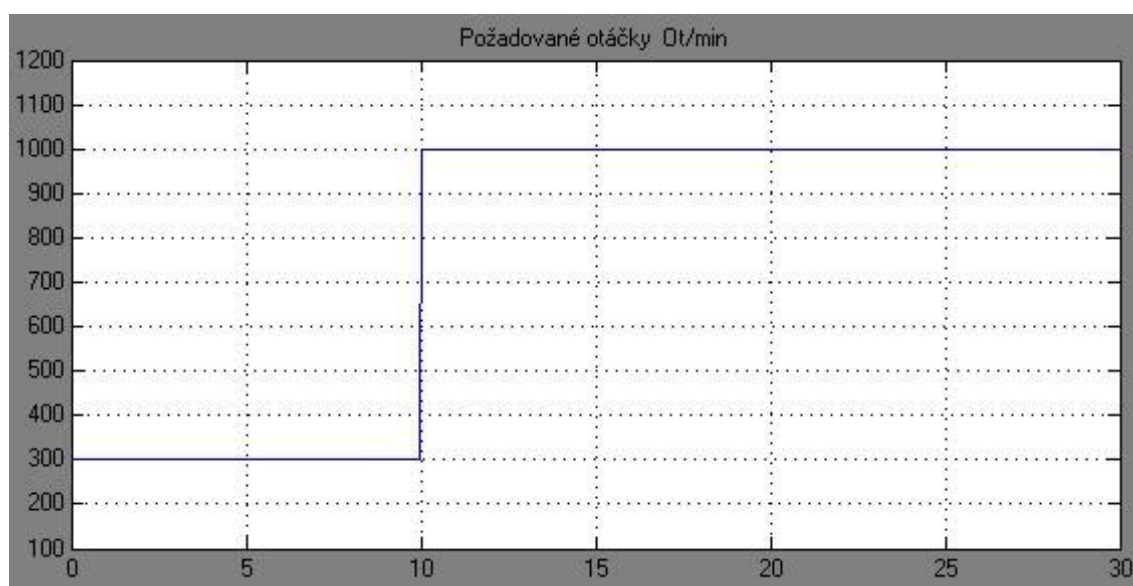


Obr. 5.28 Průběh zatěžovacího úhlu

5.6 Simulační ověření průběhu veličin za předpokladu $L_d \neq L_q$, $M_L = 0$

Skutečnost, že si indukčnosti v jednotlivých osách nejsou rovny, zapříčiní, že ve výsledných průbězích jsou vidět obě složky momentu. Poměr L_d a L_q byl zvolen pokusem a neodpovídá parametrům žádného určitého typu motoru. V těchto průbězích se jedná o nezatížený pohon.

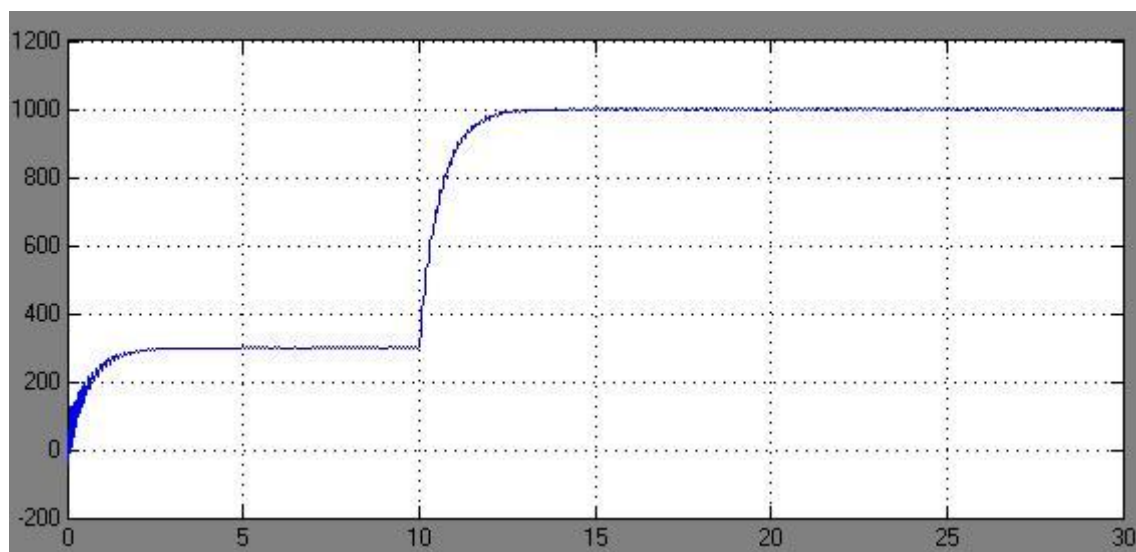
Ot/min



t(s)

Obr.5.29 Požadovaný průběh otáček

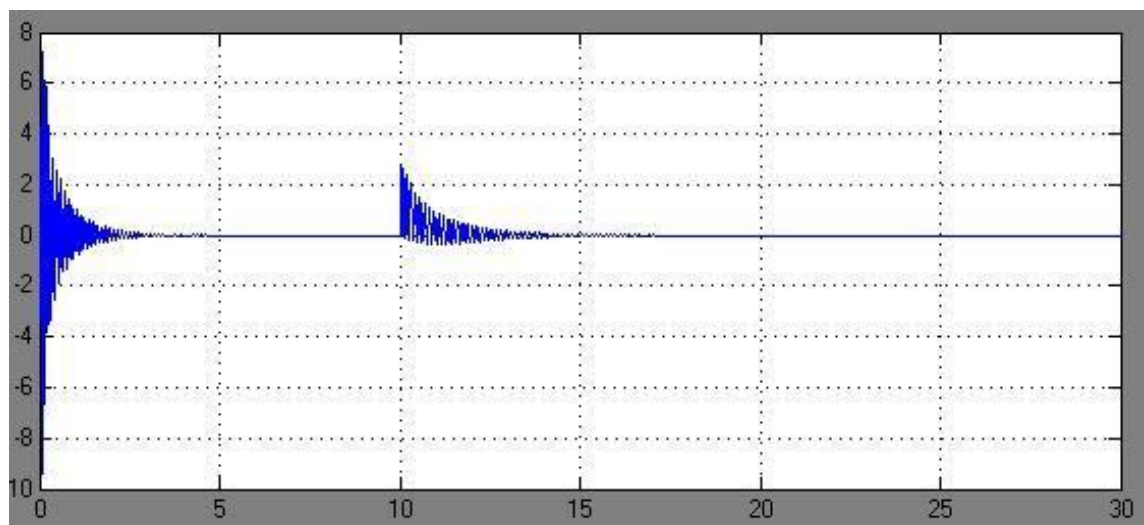
Ot/min



t(s)

Obr. 5.30 Skutečný průběh otáček

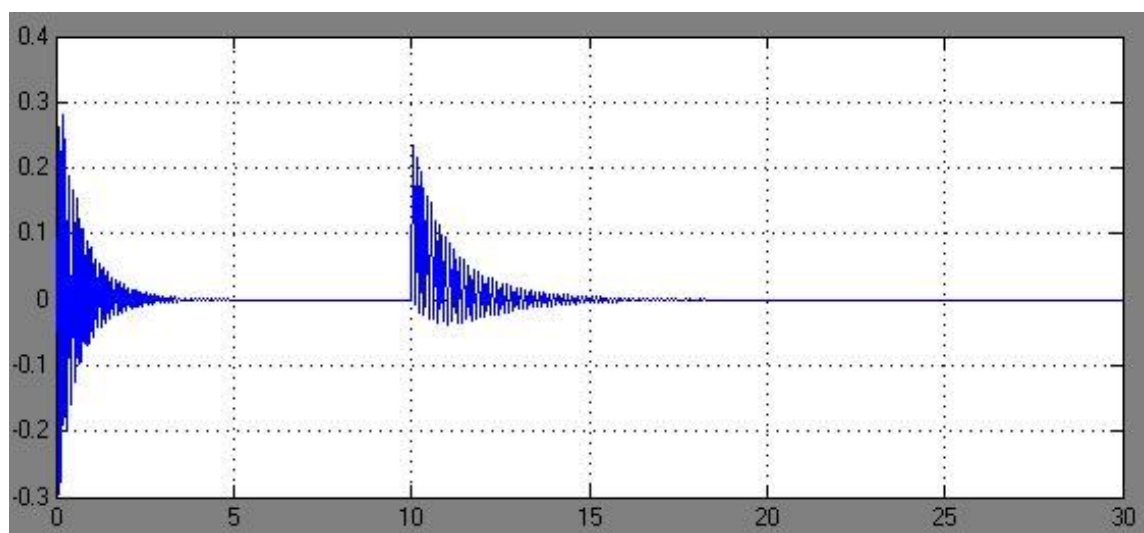
$M(\text{Nm})$



Ot/min

Obr. 5.31 Průběh momentu na skokovou reakci otáček, kdy $L_q \neq L_d$

θ



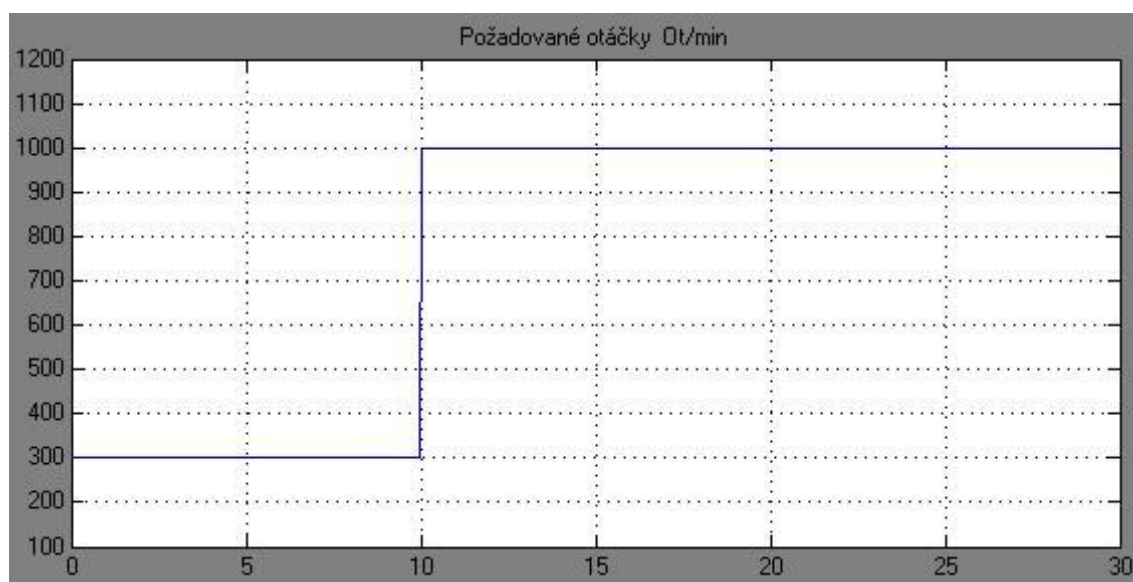
t(s)

Obr. 5.32 Průběh zatěžovacího úhlu na skokovou reakci otáček, kdy $L_q \neq L_d$

5.7 Simulační ověření průběhu veličin za předpokladu $L_d \neq L_q$, $M_L \neq 0$

Následující průběhy charakterizují stejný pohon za předpokladů že $L_d \neq L_q$ a v čase $t = 20\text{s}$ je připojen moment zátěže $M_L = 5\text{ Nm}$.

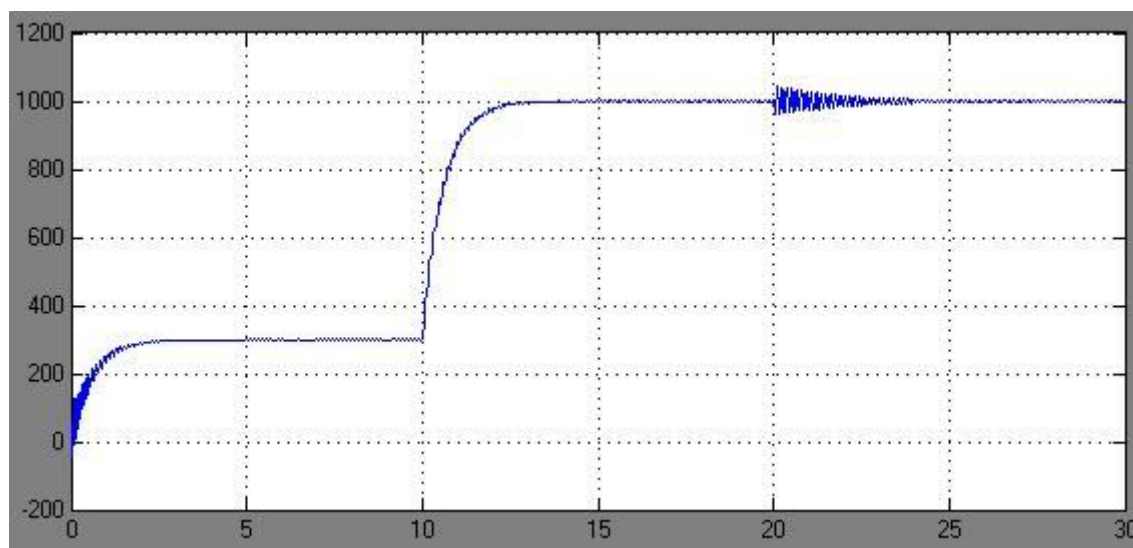
Ot/min



t(s)

Obr. 5.33 Požadovaná hodnota otáček

Ot/min

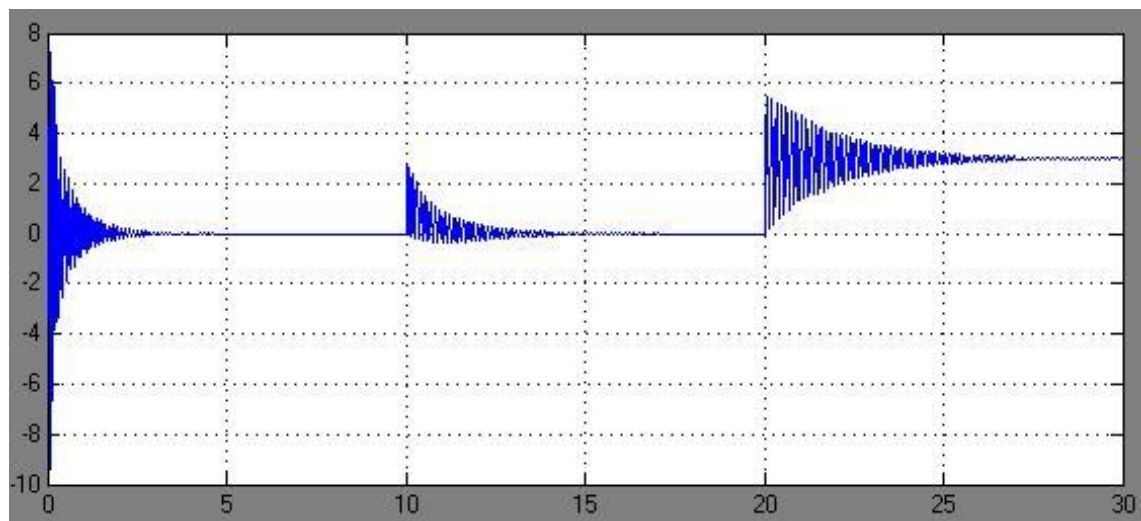


t(s)

Obr. 5.34 Skutečná hodnota otáček při reakci na připojení M_L

Připojení M_L v čase $t=20\text{s}$ je zřetelné z grafu. Na krátkou dobu dojde k zakolísání hodnoty otáček a jejich následnému stabilizování na požadované hodnotě.

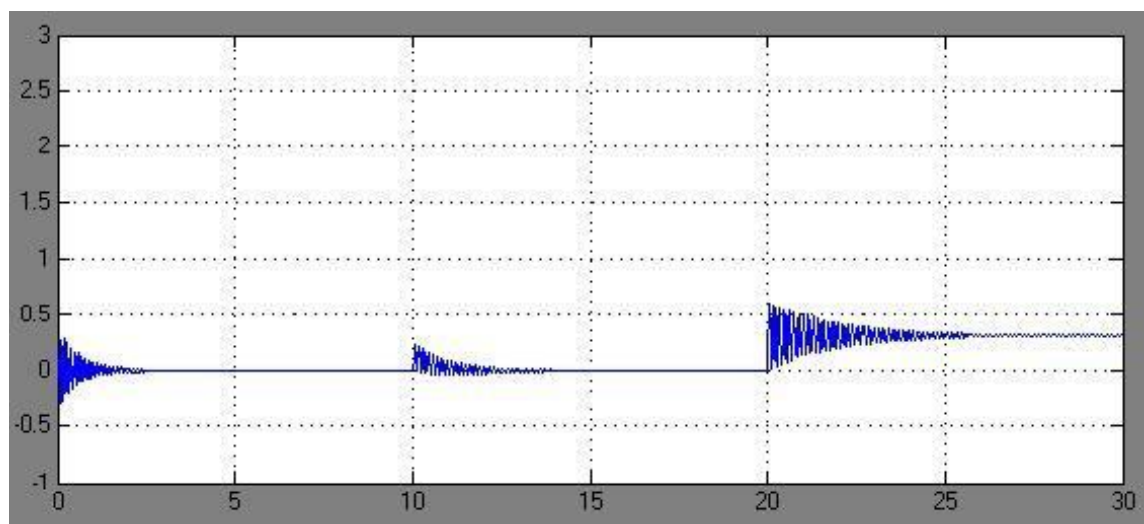
$M(\text{Nm})$



$t(\text{s})$

Obr. 5.35 Průběh momentu při reakci na skokové připojení M_L

θ



$t(\text{s})$

Obr.5.36 Průběh zátěžovacího úhlu při reakci na skokové připojení M_L

6. Závěr

V prvních kapitolách své práce jsem se pokusil přiblížit čtenáři problematiku simulačního řešení kompletních systému pohonů. Zveřejnil jsem i základní používané programy a jejich rozdělení. V další kapitole jsem se zaměřil na samotnou teorii týkající se synchronních strojů, jejich konstrukce a použití. Po seznámení s těmito fakty jsem přistoupil k řešení matematických modelů jednotlivých způsobů modelování synchronních strojů. Po uvedení rovnic potřebných k sestavení matematického modelu synchronního stroje bez uvažování elektromagnetických dějů, jsem sestavil blokové schéma modelu motoru. Dle tohoto schématu byl sestaven i simulační model synchronního motoru. Dalším bodem bylo sestavení regulační struktury, ve které jsem použil hotový regulátor z databáze programu Matlab. Tato skutečnost zapříčinila, že jsem se v práci nezabýval samotným návrhem regulátoru, ale uvedl jsem ukázky a postupy návrhu jednotlivých regulátorů rychlosti. V poslední fázi jsem sestavil celkový simulační model pohonu, na kterém jsem provedl základní měření. Výsledky jsem pomocí jednotlivých průběhů zdokumentoval v této práci. Tato oblast zatím není zdaleka dostatečně prozkoumána a v budoucnu by se dalo určitě navázat a pokračovat v řešení dalších možností.

Literatura:

- [1] Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů
doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.
VŠB, Ostrava 2002

- [2] Elektrické Regulované pohony I
doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.
VŠB, Ostrava

- [3] <http://www.humusoft.cz>
<http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/>

- [4] http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavní_strana
http://cs.wikipedia.org/wiki/Synchronní_motor#Synchronn.C3.AD_stroj

- [5] http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab/synchronni_stroje_bc.pdf

- [6] BENADA, V-Ondrůšek, č.: Spínaný reluktanční motor – model stroje a simulace chování. In: Vybrané problémy elektrických strojů a pohonů. Svratka 1999

- [7] MODELING AND SIMULATION OF PERMANENT
MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVE SYSTÉM
UNIVERSITY OF PUERTO RICO MAYAGÜEZ CAMPUS
Enrique L. Carrillo Arroyo 2006

Přílohy:

1 – Digitální nosič CD, na kterém je kompletní znění diplomové práce včetně simulačního modelu v programu Matlab Simulink.